



TUGAS AKHIR - RE 141581

***RECOVERY* GARAM DARI AIR KONSENTRAT
REVERSE OSMOSIS MENGGUNAKAN
ELEKTRODIALISIS DENGAN VARIASI RAPAT ARUS
DAN JUMLAH KOMPARTEMEN**

IMAN DIMASSETYA YANUAR YUSUF

3311 100 043

Dosen Pembimbing

Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., PhD

JURUSAN TEKNIK LINGKUNGAN

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2015



FINAL PROJECT - RE 141581

**SALT RECOVERY FROM REVERSE OSMOSIS
CONCENTRATE USING ELECTRODIALYSIS
WITH VARIATIONS OF CURRENT DENSITY
AND NUMBER OF COMPARTEMENT**

IMAN DIMASSETYA YANUAR YUSUF

3311 100 043

Supervisor

Arseto Yekti Bagastyo, S.T., M.T., M.Phil., PhD

DEPARTEMEN OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING

Faculty of Civil Engineering and Planning

Institut of Technology Sepuluh Nopember

Surabaya 2015

LEMBAR PENGESAHAN

**Recovery Garam dari Air Konsentrat Reverse Osmosis
Menggunakan Elektrodialisis dengan Variasi Rapat
Arus dan Jumlah Kompartemen**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik
pada

Program Studi S-1 Jurusan Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

IMAN DIMASSETYA YANUAR YUSUF
NRP. 3311100043

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir:



Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., MPhil., PhD.
NIP. 19820804 200501 1 001



Recovery Garam dari Air Konsentrat Reverse Osmosis Menggunakan Elektrodialisis dengan Variasi Rapat Arus dan Jumlah Kompartemen

Nama : Iman Dimassetya Yanuar Yusuf
NRP : 3311100043
Jurusan : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT.,
M.Phil., PhD

ABSTRAK

Konsentrat *reverse osmosis* mengandung salinitas tinggi sehingga mempengaruhi ekosistem laut. Elektrodialisis merupakan salah satu alternatif pengolahan konsentrat *reverse osmosis*. Proses yang terjadi adalah pemisahan garam dan air yang terdapat pada limbah *reverse osmosis*. Rapat arus dan jumlah kompartemen mempengaruhi efektifitas elektrodialisis dalam mengolah konsentrat *reverse osmosis*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektifitas elektrodialisis dalam mengolah limbah *reverse osmosis* dengan variasi rapat arus dan jumlah kompartemen. Produk samping yang dihasilkan yaitu *recovery* garam dan gas klor diteliti lebih lanjut.

Penelitian dilakukan dalam skala laboratorium dengan reaktor sistem *batch*. Variabel yang akan diuji adalah rapat arus dan jumlah kompartemen. Platina digunakan sebagai anoda dan *stainless steel* sebagai katoda. Platina yang digunakan adalah pen bekas patah tulang. Luas efektif membran sebesar 200 cm². Uji karakteristik konsentrat *reverse osmosis* dilakukan untuk mengetahui parameter TDS, salinitas, pH, Cl⁻ dan nilai permanganat. Penelitian pendahuluan dilaksanakan untuk mengetahui waktu operasi optimal untuk melakukan penelitian utama. Prinsip kerja reaktor elektrodialisis adalah dengan mengalirkan air konsentrat *reverse osmosis* pada kompartemen anoda dan katoda sehingga kation dan anion bergerak ke kompartemen tengah sehingga pada kompartemen tengah terbentuk konsentrasi garam. Parameter yang diuji pada setiap variasi adalah kandungan salinitas, pH, Cl⁻ *total chlorine* dan nilai permanganat.

Proses elektrodialisis dilakukan selama 36 jam pada masing-masing variasi. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa semakin besar rapat arus maka penurunan salinitas juga semakin tinggi. Berdasarkan analisis statistik, rapat arus dan jumlah kompartemen berpengaruh signifikan terhadap penurunan salinitas. Hal ini ditunjukkan dengan hasil penurunan salinitas terbesar berada pada rapat arus $2,5 \text{ mA/cm}^2$ dengan lima kompartemen yaitu 20,56%. Hasil produk samping berupa *recovery* garam terbesar adalah 29,28% sedangkan produksi *total chlorine* terbesar adalah 50,83 mg/L yang terjadi pada variasi $2,5 \text{ mA/cm}^2$ dengan lima kompartemen.

Kata kunci: elektrodialisis, jumlah kompartemen, rapat arus, *recovery*, reverse osmosis

Salt Recovery from Reverse Osmosis Concentrate Using Electrodialysis with Variations of Current Density and Number of Compartement

Name : Iman Dimassetya Yanuar Yusuf
NRP : 3311100043
Study Programme : Environmental Engineering
Supervisor : Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT.,
M.Phil., PhD

ABSTRACT

Reverse osmosis concentrate contains high salinity that may pose adverse effects on marine ecosystems. Electrodialysis is one alternative methods for reverse osmosis concentrate treatment. Processes that occur in electrodialysis are cation-anion separation which promotes salt recovery and chloride minimisation through oxidation to produce chlorine gas. Current density and number of compartement in the electrodialysis affects the effectiveness of reverse osmosis concentrate treatment. Relation between current density and number of compartement for the effectiveness of treatment were investigated. Salt recovery and production of chlorine gas further investigated.

This study was conducted in a laboratory scale with bath reactor system. Variables to be tested are current density and number of compartement. Pt is used as anode and stainless steel used as cathode. Membrane effective area is 200 cm². Characteristics of reverse osmosis concentrate is tested to determine TDS, salinity, Cl⁻, and permanganate value. Preliminary studies carried out to determine the optimal duration to be used in primary research. Principle of electrodialysis reactor is distributing the reverse osmosis concentrate to anode and cathode compartement so that cations and anions move into middle compartement and forming salt concentration. Parameters were tested at each variation are salinity, pH, total chlorine, Cl⁻, and permanganate value.

Electrodialysis process performed for 36 hours on each variation. The results showed that higher applied current density lead to higher salinity removal efficiency. Based on statistical

analysis, current density and number of compartment have a significant effect to salinity removal efficiency. This is indicated by the results of the highest salinity removal efficiency achieved at current density of $2,5 \text{ mA/cm}^2$ with five compartments was 20,56%. Results byproducts such as highest salt recovery is 29,28% while the highest production of total chlorine was 50,83 mg/L which occurs in $2,5 \text{ mA/cm}^2$ with five compartments.

Keyword(s): current density, electrodialysis, number of compartment, recovery, reverse osmosis

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Puji syukur penyusun panjatkan ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya tugas akhir ini dapat diselesaikan tepat waktu. Tugas akhir yang berjudul "Pengolahan Air Limbah *Reverse Osmosis* dengan Variasi Rapat Arus dan Jumlah Kompartemen Menggunakan Elektrodialisis" dibuat dalam rangka menyelesaikan studi tahap sarjana. Dalam penyusunan laporan ini, penyusun menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, ST, MT, M.Phil, Ph.D., selaku dosen pembimbing tugas akhir.
2. Bapak Prof. Ir. Wahyono Hadi, M.Sc., Ph.D selaku dosen penguji tugas akhir.
3. Bapak Alfian Purnomo, ST, MT selaku dosen penguji tugas akhir.
4. Bapak Ir. Hariwiko, M. Eng selaku dosen penguji tugas akhir
5. Bapak Dr. Ali Masduqi ST, MT selaku dosen penguji tugas akhir
6. Para karyawan PT PLN Tanjung Jati B yang sudah mengizinkan dan membantu kami dalam melaksanakan tugas akhir ini.
7. Orang tua penulis yang selalu memberikan doa dan semangat
8. Sahat Ricky Pranata Ompusunggu selaku kolega yang selalu bertukar pikiran dan memberikan pendapat dalam pelaksanaan tugas akhir ini.
9. Nia Sovianita Ari Dani yang setia menemani penulis untuk bertukar pikiran dan memberikan saran untuk tugas akhir ini.
10. Teman-teman laboratorium pengendalian pencemaran udara dan perubahan iklim yang setia menemani penyusun untuk melakukan tugas akhir.
11. Teman-teman laboratorium pemulihan air dan workshop serta teman-teman 2011 yang tidak bisa saya sebutkan satu-satu, terimakasih atas saran, bantuan, dan kerjasamanya.

Penyusunan tugas akhir ini telah diusahakan semaksimal mungkin, namun juga tidak luput dari kesalahan penyusun. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Ruang Lingkup	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Desalinasi	7
2.1.1 Proses Desalinasi Air Laut	7
2.1.2 Teknik-teknik Desalinasi Air Laut	7
2.2 Osmosis Balik	11
2.2.1 Pengertian Osmosis Balik	11
2.2.2 Desalinasi Air Laut Menggunakan Osmosis Balik	13
2.2.3 Karakteristik Air Buangan Osmosis Balik	15
2.2.4 Alternatif Pengolahan Limbah <i>Reverse Osmosis</i>	17
2.3 Elektrodialisis	19
2.3.1 Prinsip Kerja Elektrodialisis	19
2.3.2 Membran Bipolar	21
2.3.3 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Kinerja Elektrodialisis	23
2.4 Hukum Ohm	25
2.5 Kebutuhan Energi	26
2.6 Penelitian Terdahulu	27
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1 Kerangka Penelitian	29
3.2 Studi Literatur	31
3.3 Ide Penelitian	31
3.4 Penentuan Variabel dan Parameter	32
3.5 Persiapan Penelitian	32
3.6 Penelitian Utama	37

3.7	Analisa Data dan Pembahasan	38
3.8	Kesimpulan dan Saran	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		39
4.1	Penelitian Pendahuluan	39
4.1.1	Karakteristik Air Konsentrat <i>Reverse Osmosis</i>	39
4.1.2	Penentuan Waktu Operasi Elektrodialisis	39
4.2	Penelitian Utama	46
4.2.1	Persentase <i>Removal</i> Salinitas dan Klorida	48
4.2.2	Hasil <i>Recovery</i> Garam dan <i>Total Chlorine</i>	51
4.2.3	Nilai pH pada Kompartemen Anoda	55
4.2.4	Penurunan Nilai Permanganat.....	56
4.2.5	Kebutuhan Energi	57
4.2.6	Uji Statistik <i>Anova-Two Ways</i>	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		65
5.1	Kesimpulan	65
5.2	Saran	65
DAFTAR PUSTAKA.....		67
LAMPIRAN A ANALISIS DAN PERHITUNGAN		71
LAMPIRAN B ANALISIS LABORATORIUM.....		83
LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN		87

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Proses Desalinasi Air Laut	7
Gambar 2.2 Proses Multi Stage Flash Distillation	9
Gambar 2.3 Cara Kerja Osmosis	12
Gambar 2.4 Cara Kerja Osmosis Balik	12
Gambar 2.5 Proses Membran Osmosis Balik	14
Gambar 2.6 Prinsip kerja elektrodialisis	20
Gambar 2.7 Prinsip kerja membran bipolar	22
Gambar 3.1 Kerangka Penelitian	31
Gambar 3.2 Konfigurasi reaktor ED	35
Gambar 3.3 Sistem elektrodialisis dengan tiga dan lima kompartemen	36
Gambar 4.1 Sistem Reaktor Elektrodialisis dan Titik Pengambilan Sampel	40
Gambar 4.2 Penurunan TDS	41
Gambar 4.3 Penurunan Salinitas	41
Gambar 4.4 Nilai TDS dan Salinitas pada Aquades	42
Gambar 4.5 Perubahan Warna pada Reaktor	43
Gambar 4.6 Persentase <i>Recovery</i> TDS dan Salinitas pada Aquades	44
Gambar 4.7 Perubahan Nilai pH	44
Gambar 4.8 Perubahan Voltase	45
Gambar 4.9 Mekanisme Pertukaran Kation dan Anion	46
Gambar 4.10 Mekanisme Resirkulasi Kation dan Anion	47
Gambar 4.11 Mekanisme Oksidasi dan Reduksi pada Reaktor	47
Gambar 4.12 Persentase <i>Removal</i> Salinitas	49
Gambar 4.13 Persentase <i>Removal</i> Klorida	50
Gambar 4.14 Persentase <i>Recovery</i> Garam	52
Gambar 4.15 Konsentrasi <i>Total Chlorine</i>	54
Gambar 4.16 Nilai pH Berdasarkan Waktu	55
Gambar 4.17 Persentase <i>Removal</i> Nilai Permanganat	57
Gambar 4.18 <i>Removal</i> dan <i>Recovery</i> Salinitas serta <i>Removal</i> Nilai Permanganat Terhadap Kebutuhan Energi Reaktor Tiga Kompartemen	58
Gambar 4.19 <i>Removal</i> dan <i>Recovery</i> Salinitas serta <i>Removal</i> Nilai Permanganat Terhadap Kebutuhan Energi Reaktor Tiga Kompartemen	59

Gambar 4.20 <i>Removal</i> dan <i>Recovery</i> Klorida serta Produksi <i>Total Chlorine</i> Terhadap Kebutuhan Energi Reaktor Tiga Kompartemen	60
Gambar 4.21 <i>Removal</i> dan <i>Recovery</i> Klorida serta Produksi <i>Total Chlorine</i> Terhadap Kebutuhan Energi Reaktor Lima Kompartemen	61
Gambar 4.22 Persentase <i>Recovery</i> Garam yang Dapat Dihasilkan dengan 1 Kwh/m ³	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik Air Buangan <i>Reverse Osmosis</i>	15
Tabel 2.2 Karakteristik air limbah <i>reverse osmosis</i> PT PLN Pembangkit Kabupaten Jepara	16
Tabel 2.3 Penelitian terdahulu	27
Tabel 3.1 Metode Pengukuran Setiap Parameter	32
Tabel 3.2 Variasi Reaktor Uji	37
Tabel 4.1 Karakteristik Awal Air Konsentrat <i>Reverse Osmosis</i> ..	39
Tabel 4.2 Hasil Uji <i>Anova-Two Ways</i>	63

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air yang ada di bumi sebesar 96,5% terdapat pada laut, dan 1,7% berada dalam bentuk bongkahan es. Hanya sekitar 0,8% dapat dikatakan sebagai air tawar yang dapat diminum. Presentase sisanya terdiri dari air payau, air yang sedikit asin pada air permukaan, dan sebagai air tanah pada lapisan akuifer asin (Greenlee *et al.*, 2009). Kurangnya kuantitas air minum menyebabkan adanya pengolahan air agar dapat dimanfaatkan menjadi air minum. Salah satunya adalah menggunakan proses desalinasi, yaitu mengolah air asin menjadi air minum.

Desalinasi air laut dan air payau telah menjadi metode yang umum untuk mendapatkan air minum di seluruh dunia (Jeppesen *et al.*, 2009). Menurut Latteman dan Höpner (2008), produksi air bersih dari proses desalinasi di seluruh dunia mencapai sekitar 25.000.000 m³ setiap hari. Kategori pengolahan menggunakan proses desalinasi ada dua, yaitu menggunakan panas dan membran (Greenlee *et al.*, 2009). Unit pengolahan yang umum digunakan adalah *Multi Stage Flash* (MSF) dengan sistem pemanasan dan *Reverse Osmosis* (RO) dengan sistem membran.

RO saat ini merupakan teknik desalinasi yang paling banyak digunakan secara global (Lee *et al.*, 2011), salah satunya di Indonesia. Penggunaan RO umumnya digunakan untuk menyediakan air minum dari air laut bagi masyarakat, akan tetapi banyak industri yang membutuhkan air tawar dengan air baku berupa air laut untuk proses produksi. Menurut Roberts *et al.* (2011), unit pengolahan air minum menggunakan teknik desalinasi mengambil volume air laut yang besar dan membuang air dengan kadar garam tinggi masuk ke dalam badan air penerima yaitu laut. Air limbah yang dikeluarkan dari proses desalinasi menggunakan RO mempunyai kadar garam yang dibuang lebih tinggi daripada kadar garam atau salinitas di laut. Tipikal TDS (*Total Dissolved Solid*) limbah RO air laut adalah 65.000 – 80.000 mg/L (Latteman dan Höpner, 2008).

Air buangan RO atau konsentrat RO berpotensi menyebabkan penurunan kualitas lingkungan. Kadar garam tinggi

dan zat – zat pencemar yang mengandung logam berat dari konsentrat RO akan mempengaruhi habitat padang lamun, dan menyebabkan perubahan komposisi spesies organisme laut di sekitar area *outlet*. Organisme laut dapat menerima atau menolak kondisi lingkungan yang baru, dan yang mudah beradaptasi akan tersebar merata di area pembuangan limbah. Selain kadar garam yang tinggi, juga terdapat pencemar logam berat seperti besi, nikel, kromium akan tetapi kadarnya tidak dalam taraf berbahaya. Pencemar *antiscalant* juga terdapat pada konsentrat RO, tetapi toksisitas untuk semua jenis *antiscalant* bagi kehidupan biota laut adalah sangat kecil (Latteman dan Höpner, 2008). Dampak pencemaran yang terjadi diatas dapat diminimasi dengan pengolahan limbah desalinasi, seperti injeksi sumur dalam, kolam evaporasi, dan elektrodialisis (Jeppesen *et al.*, 2009).

Salah satu alternatif pengolahan limbah desalinasi RO adalah menggunakan elektrodialisis. Elektrodialisis (ED) adalah proses pemisahan berbasis membran pada unsur yang dapat terionisasi seperti garam dan asam yang berpindah lewat membran dari satu larutan ke larutan yang lain dengan bantuan arus listrik (Praneeth *et al.*, 2014). Elektrodialisis dapat digunakan untuk beberapa tipe yang umum digunakan untuk proses pemisahan, seperti pemisahan dan penjenjuran garam, asam, dan basa dari larutan cair. Elektrodialisis merupakan pengolahan yang selektif terhadap kontaminan yang akan diolah, seperti natrium, kalsium, kalium, nikel, dan lain-lain (Schoeman dan Thompson, 1996). Salinitas yang tinggi pada konsentrat RO memungkinkan digunakan elektrodialisis untuk memisahkan garam dan air. Garam akan diseleksi melalui membran penukar ion sehingga dapat terpisah dari senyawa yang lain (Casas *et al.*, 2012).

Menurut Jiang *et al.* (2014), air bersih dan garam kasar dapat diambil kembali dari air konsentrat RO dengan menggunakan elektrodialisis. Kandungan salinitas yang tinggi pada konsentrat RO berpotensi untuk dilakukan pengambilan garam kembali atau *recovery* garam. Selain pengambilan garam kembali, dengan proses elektrodialisis mampu menghasilkan gas klor (Cl_2). Gas klor yang kemudian dapat dimanfaatkan sebagai desinfektan ini merupakan sebuah hasil samping dari proses elektrodialisis (Pretz *et al.*, 1999).

Keuntungan untuk mengolah konsentrat RO menggunakan elektrodialisis adalah dapat memisahkan ion-ion yang terkandung pada air konsentrat terutama garam sehingga didapatkan air bersalinitas rendah dan air terkonsentrasi garam. Berdasarkan Korngold *et al.* (2009), efisiensi pemisahan NaCl pada air konsentrat RO dengan elektrodialisis dapat mencapai 84%. Sehingga dapat dikatakan mempunyai efisiensi yang tinggi untuk mengolah air konsentrat RO. Kekurangan dari elektrodialisis adalah terjadi *fouling* jika terdapat kandungan organik, padatan tersuspensi dan kekeruhan yang cukup tinggi. Efisiensi pemisahan kandungan organik dengan elektrodialisis tergolong kecil (Strathmann, 2010).

Menurut Sutrisna (2002), faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja elektrodialisis antara lain adalah tegangan listrik, luas permukaan kontak, rapat arus dan konsentrasi limbah. Arus listrik mempengaruhi kinerja elektrodialisis dengan cara ketika arus listrik dilewatkan ke dalam sistem, ion – ion akan bergerak melewati membran penukar ion menuju elektroda yang memiliki muatan berlawanan dengan ion tersebut (hal yang sama seperti pada kompartemen diluat dari suatu sel elektrodialisis). Tingginya arus listrik menyebabkan tingginya rapat arus yang terjadi dalam satuan per luas membran sehingga proses pertukaran ion menjadi lebih cepat. Berdasarkan penelitian Zhang *et al.* (2012), pada rapat arus sebesar 1 mA/cm^2 - 9 mA/cm^2 didapatkan kondisi yang optimal untuk mengolah konsentrat *reverse osmosis* dengan efisiensi removal garam sebesar 81%. Jumlah kompartemen mempengaruhi luas permukaan kontak ion yang terjadi pada elektrodialisis. Menurut Gao *et al.* (2009), semakin besar luas permukaan kontak ion maka mobilitas ion untuk berpindah semakin besar sehingga meningkatkan efektifitas elektrodialisis. Menurut Mirfada (2014), jumlah kompartemen berbanding lurus dengan efektifitas elektrodialisis, yaitu pada tujuh kompartemen penurunan TDS lebih tinggi daripada lima kompartemen.

Berdasarkan hal tersebut diatas, maka diperlukan kajian mengenai efektifitas dalam mengolah air konsentrat RO dari proses desalinasi. Dalam tugas akhir ini, akan dikaji untuk mengetahui pengaruh rapat arus dan jumlah kompartemen menggunakan proses elektrodialisis. Pengaruh rapat arus dengan

jumlah kompartemen terhadap efektifitas proses elektrodialisis dalam aplikasinya pada industri yang membutuhkan desalinasi air laut.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Berapakah efisiensi penurunan salinitas terhadap pengaruh rapat arus dan jumlah kompartemen menggunakan elektrodialisis?
2. Bagaimanakah hasil dari produk samping yang didapat dari air konsentrat RO menggunakan elektrodialisis?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis efisiensi penurunan salinitas terhadap pengaruh rapat arus dan jumlah kompartemen menggunakan elektrodialisis
2. Menganalisis hasil dari produk samping yang didapat dari air konsentrat RO menggunakan elektrodialisis

1.4 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini adalah :

1. Sampel diambil dari PLTU Tanjung Jati B Jepara
2. Variabel yang akan digunakan adalah rapat arus yaitu 1 mA/cm^2 , $1,5 \text{ mA/cm}^2$, 2 mA/cm^2 , $2,5 \text{ mA/cm}^2$ dan jumlah kompartemen yaitu tiga kompartemen dan lima kompartemen
3. Parameter yang akan diuji adalah nilai pH, kandungan salinitas, nilai permanganat, kandungan Cl^- dan *total chlorine*.
4. Penelitian dilakukan skala laboratorium dengan menggunakan sistem *batch*
5. Elektroda yang digunakan adalah platina sebagai anoda dan *stainless steel* sebagai katoda
6. Debit yang digunakan sebesar $22,5 \text{ L/jam}$

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah :

1. Memberikan rekomendasi alternatif pengolahan air konsentrat *reverse osmosis* kepada PLTU Tanjung Jati B Jepara
2. Memberikan informasi tentang metode pengolahan air konsentrat *reverse osmosis* yang menghasilkan garam

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

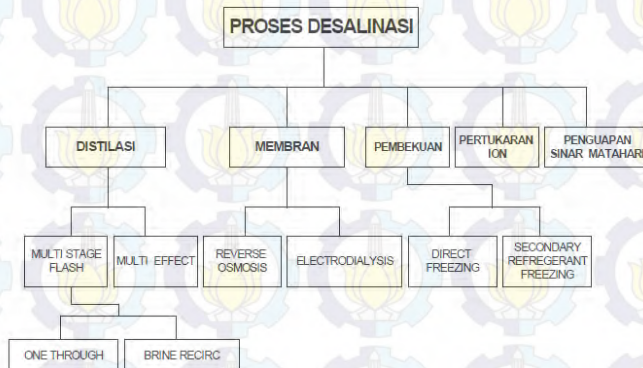
2.1 Desalinasi

2.1.1 Proses Desalinasi Air Laut

Desalinasi adalah proses pemisahan yang digunakan untuk mengurangi kandungan garam terlarut dari air garam hingga level tertentu sehingga air dapat digunakan (Reddy *et al.*, 2011). Proses desalinasi melibatkan tiga aliran cairan, yaitu umpan berupa air garam (misalnya air laut), produk bersalinitas rendah, dan konsentrat bersalinitas tinggi (Chen *et al.*, 2011).

Proses desalinasi air laut memisahkan larutan air laut yang asin menjadi dua aliran, aliran air tawar yang mengandung sedikit garam terlarut dan aliran air garam terkonsentrasi. Proses ini memerlukan beberapa bentuk energi untuk menghilangkan garam, dan menggunakan teknologi yang berbeda untuk pemisahan garam. Berbagai teknologi desalinasi telah dikembangkan selama bertahun-tahun dengan prinsip destilasi termal, pemisahan menggunakan membran, pendinginan, elektrodialisis, dan lain-lain (Khawaji *et al.*, 2008).

2.1.2 Teknik-teknik Desalinasi Air Laut



Gambar 2.1 Klasifikasi Proses Desalinasi Air Laut
(Said, 2003)

Metode untuk mendapatkan air tawar dari air laut (desalinasi) dapat menggunakan banyak cara, diantaranya dengan prinsip destilasi, membrane, pembekuan, pertukaran ion,

dan penguapan sinar matahari. Pada Gambar 2.1 menunjukkan berbagai metode yang dapat digunakan untuk proses desalinasi

A. Multi Stage Flash Distillation

Apabila air laut yang telah dipanaskan dialirkan kedalam vesel pada tekanan kecil, sebagian dari air laut yang dipanaskan akan segera mendidih dengan mengambil panas penguapan dari sisa air laut sehingga mengakibatkan penurunan temperatur sisa air laut. Fenomena ini disebut *flash evaporation*.

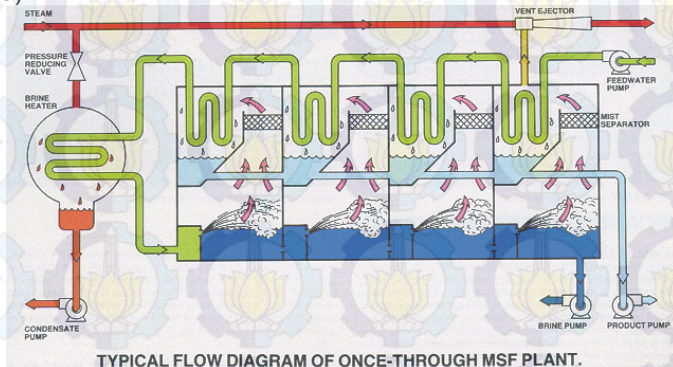
Gambar 2.2 adalah diagram yang disederhanakan tentang proses *multistage flash distillation*. *Evaporator* (penguap) dibagi dalam beberapa bagian yang disebut "stage". Gambar tersebut memperlihatkan empat *stage* (tahap) *evaporator*, namun pada umumnya di tempat pengolahan terdapat lebih dari sepuluh *stage*. Setiap *stage* selanjutnya dibagi menjadi *flash chamber* yang merupakan ruangan yang terletak dibawah pemisah kabut dan bagian kondensor yang terletak diatas pemisah kabut.

Air laut dialirkan dengan pompa kedalam bagian kondensor melalui tabung penukar panas dan hal ini menyebabkan terjadi pemanasan air laut oleh uap air yang terjadi dalam setiap *flash chamber*. Kemudian air laut selanjutnya dipanaskan dalam pemanas garam dan kemudian dialirkan ke dalam *flash chamber* tahap pertama. Setiap tahap dipertahankan dengan kondisi vakum tertentu dengan sistem *vent ejector*, dan beda tekanan antara tahap-tahap dipertahankan dengan sistem *vent orifices* yang terdapat pada vent penyambung pipa yang menyambungkan antara tahap-tahap.

Air laut yang telah panas mengalir dari tahap bertemperatur tinggi ke tahap bertemperatur rendah melalui suatu bukaan kecil antara setiap tahap yang disebut *brine orifice*, sementara itu penguapan tiba-tiba (*flash evaporates*) terjadi dalam setiap *chamber*, air laut pekat keluar dari tahap terakhir dengan menggunakan pompa garam (*brine pump*).

Uap air yang terjadi dalam *flash chamber* pada setiap tahap mengalir melalui pemisah kabut, dan mengeluarkan panas laten ke dalam tabung penukar panas sementara air laut mengalir melalui bagian dalam dan kemudian uap berkondensasi. Air yang terkondensasi dikumpulkan dalam dalam suatu papan (*tray*). Air yang terkondensasi biasanya disebut destilat atau air produk,

yang dihasilkan dari pemanasan air laut secara bertahap yakni dari tahap bertemperatur panas ke tahap bertemperatur rendah dan dipisahkan dari tahap terakhir dengan pompa produk (Said, 2003).



TYPICAL FLOW DIAGRAM OF ONCE-THROUGH MSF PLANT.
Gambar 2.2 Proses Multi Stage Flash Distillation
(Said, 2003)

B. Multiple Effect Distillation

Multiple effect adalah suatu proses yang terdiri dari beberapa *chambers flash* yang disebut "effect". Dalam proses ini, hanya tabung pertama yang dialiri uap dari boiler dan tabung kedua selanjutnya memperoleh uap yang diproduksi oleh tabung sebelumnya. Dalam *multi effect evaporator*, air laut disemprotkan ke bagian luar dari tabung penukar panas yang diletakkan secara horizontal. Pada saat uap air yang lebih panas yang terdapat dalam tabung berkondensasi dan menghasilkan air tawar, saat itu pula menyebabkan air laut diluar tabung mendidih, dan menghasilkan uap air baru yang kemudian mengalir ke tabung penukar panas berikutnya (Said, 2003).

C. Vapour Compression Method

Apabila dilakukan penekanan adiabatik terhadap uap air, maka temperatur akan naik dan terkondensasi pada temperatur tinggi. Berdasarkan pada teori ini, uap air yang diproduksi dalam evaporator dapat digunakan kembali sebagai uap pemanas untuk evaporator yang sama. Proses ini disebut *vapour compression distillation*.

Dalam sistem ini terdapat empat komponen utama; pemanas awal air baku, tabung evaporator horizontal dan *thin film evaporation*, blower uap sebagai kompresor dan pemanas atau penukar panas yang mengambil panas dari beberapa sumber panas cadangan. Kondisi vakum pada pengolahan dipertahankan dengan menggunakan pompa vakum kecil. Air baku yang masuk diolah dengan penambahan dengan jumlah kecil zat penghambat kerak (Said, 2003).

D. Metode Osmosis Balik

Apabila dua buah larutan dengan konsentrasi rendah dan konsentrasi tinggi dipisahkan oleh membran *semi-permeable*, maka larutan dengan konsentrasi yang rendah akan terdifusi melalui membran *semi-permeable* tersebut masuk ke dalam larutan konsentrasi tinggi sampai terjadi kesetimbangan konsentrasi. Fenomena tersebut dikenal sebagai proses osmosis. Sebagai contoh misalnya, jika air tawar dan air laut (asin) dipisahkan dengan membran semi permeable, maka air tawar akan terdifusi ke dalam air asin melalui membran semi permeable tersebut sampai terjadi kesetimbangan.

Daya penggerak (*driving force*) yang menyebabkan terjadinya aliran difusi air tawar ke dalam air asin melalui membran *semi-permeable* tersebut dinamakan tekanan osmosis. Besarnya tekanan osmosis tersebut tergantung dari karakteristik membran, temperatur air, dan konsentarsi garam yang terlarut dalam air. Tekanan osmotik normal air-laut yang mengandung TDS 35.000 ppm dan suhu 25°C adalah kira-kira 26,7 kg/cm², dan untuk air laut di daerah timur tengah atau laut Merah yang mengandung TDS 42,000 ppm, dan suhu 300°C, tekanan osmotik adalah 32,7 kg /m².

Apabila pada suatu sistem osmosis tersebut, diberikan tekanan yang lebih besar dari tekanan osmosisnya, maka aliran air tawar akan berbalik yakni dari dari air asin ke air tawar melalui membran semi permeable, sedangkan garamnya tetap tertinggal di dalam larutan garamnya sehingga menjadai lebih pekat. Proses tersebut dinamakan osmosis balik (*reverse osmosis*) (Said, 2003).

E. Freezing

Selama proses pembekuan, garam terlarut tidak dimasukkan selama proses pembentukan kristal es. Dalam kondisi yang terkendali, air laut dapat didesalinasi dengan pembekuan untuk membentuk kristal es. Sebelum seluruh air telah dibekukan, campuran tersebut biasanya dicuci dan dibilas untuk menghilangkan garam dalam air yang tersisa atau yang terdapat pada es. Es tersebut kemudian mencair sehingga menghasilkan air tawar. Oleh karena itu, proses pembekuan terdiri dari pendinginan air laut, kristalisasi parsial es, pemisahan es dari air laut, pencairan es, pendinginan, dan penolakan panas (Khawaji *et al.*, 2008).

2.2 Osmosis Balik

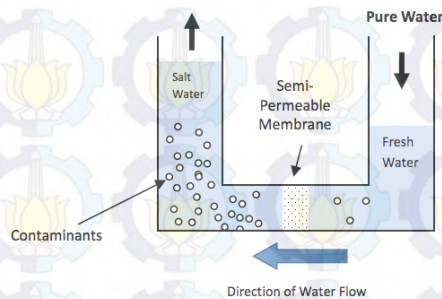
2.2.1 Pengertian Osmosis Balik

Osmosis balik atau yang biasa disebut *reverse osmosis* adalah proses dimana dilakukan demineralisasi dan deionisasi air dengan mendorongnya dengan tekanan melewati sebuah membran *semi-permeable*. Pada prinsipnya, untuk mengetahui proses osmosis balik harus diketahui dahulu proses osmosis (Hoofman, 2003).

Osmosis adalah fenomena yang terjadi secara alami dan salah satu proses penting yang terjadi di alam. Osmosis adalah proses dimana larutan yang berkonsentrasi garam tinggi. Contoh osmosis adalah ketika akar tanaman menyerap air dari tanah dan ginjal menyerap air dari darah. Pada Gambar 2.3 menunjukkan bagaimana cara kerja osmosis. Sebuah larutan yang memiliki konsentrasi rendah akan secara alami berpindah ke larutan yang memiliki konsentrasi tinggi (Hoofman, 2003).

Sebagai contoh, jika ada wadah penuh air dengan konsentrasi garam rendah dan wadah lain penuh air dengan konsentrasi garam tinggi mereka dipisahkan oleh membran *semi-permeable*, maka air dengan konsentrasi garam rendah akan mulai bermigrasi atau berpindah ke arah wadah yang penuh air dengan konsentrasi garam yang lebih tinggi. Membran *semi-permeable* adalah membran yang akan menyeleksi beberapa atom yang dapat melewatinya (Hoofman, 2003).

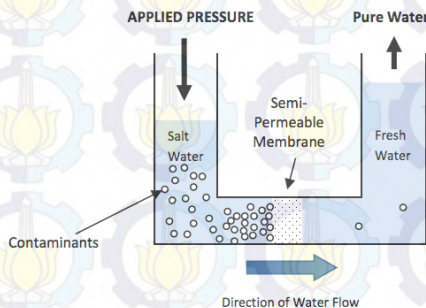
Osmosis



Gambar 2.3 Cara Kerja Osmosis
(Hoofman, 2003)

Osmosis balik adalah proses dimana osmosis berlangsung terbalik. Sementara osmosis terjadi secara alami tanpa energi yang diperlukan, untuk membalikkan proses osmosis dibutuhkan energi pada larutan terkonsentrasi garam tinggi. Pada larutan terkonsentrasi garam tinggi didorong dengan tekanan yang lebih besar daripada tekanan alami sehingga terjadi proses osmosis melewati membran *semi-permeable* guna menghilangkan garam (demineralisasi atau deionisasi) dalam air pada proses tersebut. Air bersih yang lewat melalui membran, sementara menahan kontaminan yang ada dalam air (Hoofman, 2003). Pada Gambar 2.4 menunjukkan bagaimana osmosis balik terjadi pada air.

Reverse Osmosis



Gambar 2.4 Cara Kerja Osmosis Balik
(Hoofman, 2003)

2.2.2 Desalinasi Air Laut Menggunakan Osmosis Balik

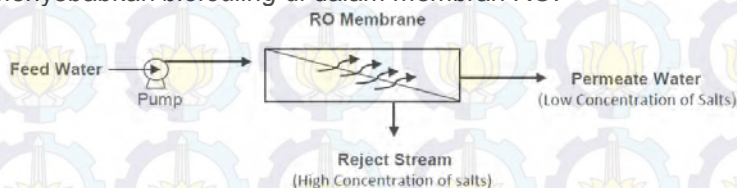
Proses desalinasi air laut dengan sistem osmosis balik atau *reverse osmosis* (RO), tidak memungkinkan untuk memisahkan seluruh garam dari air laut, karena akan membutuhkan tekanan yang sangat tinggi. Oleh karena itu pada kenyataannya, untuk menghasilkan air tawar maka air asin atau air laut dipompa dengan tekanan tinggi ke dalam satu modul membran osmosis balik yang mempunyai dua buah outlet yakni outlet untuk air tawar yang dihasilkan dan outlet untuk air garam yang telah dipekatkan (*reject water*).

Proses penyaringan dengan ukuran molekul, yakni partikel yang molekulnya lebih besar daripada molekul air, misalnya molekul garam dan lainnya, akan terpisah dan akan terikut dalam air buangan (*reject water*) seperti yang dijelaskan pada Gambar 2.4 terjadi pada membran RO. Oleh karena itu air yang akan masuk kedalam membran RO harus mempunyai persyaratan tertentu misalnya kekeruhan harus nol, kadar besi harus $<0,1$ mg/L, pH harus dikontrol agar tidak terjadi pergerakan kalsium dan lainnya.

Proses pengolahan air minum dengan sistem *reverse osmosis* terdiri dari dua bagian yakni unit pengolahan pendahuluan dan unit RO. Karena air baku yang dipakai adalah air laut, terutama yang dekat dengan pantai masih mengandung partikel padatan tersuspensi, mineral, plankton dan lainnya maka air baku tersebut perlu dilakukan pengolahan pendahuluan sebelum diproses di dalam unit RO. Unit pengolahan pendahuluan tersebut terdiri dari beberapa peralatan utama yakni pompa air baku, bak koagulasi-flokulasi, tangki reaktor (kontaktor), saringan pasir, filter mangan zeolit, dan filter untuk penghilangan warna (*color removal*), dan filter cartridge ukuran $0,5 \mu\text{m}$. Sedangkan unit RO terdiri dari pompa tekanan tinggi dan membran RO, serta pompa dosing untuk *anti scalant*, dan *anti biofouling* dan *sterilisator* ultra violet (UV).

Gambar 2.5 menjelaskan tentang bagaimana air diolah pada *reverse osmosis*. Air baku (air laut) dipompa ke bak koagulasi-flokulasi untuk mengendapkan zat padat tersuspensi, selanjutnya dialirkan ke *rapid sand filter*, selanjutnya ditampung di dalam bak penampung. Dari bak penampung air laut dipompa ke

pressure filter sambil diinjeksi dengan larutan kalium permanganat agar zat besi atau mangan yang larut dalam air baku dapat dioksidasi menjadi bentuk senyawa oksida besi atau mangan yang tak larut dalam air. Selain itu diinjeksikan larutan *anti-scalant*, *anti-biofouling* yang dapat berfungsi untuk mencegah pengerasan serta membunuh mikroorganisme yang dapat menyebabkan *biofouling* di dalam membran RO.



Gambar 2.5 Proses Membran Osmosis Balik
(Said, 2003)

Air dialirkan ke saringan filter multi media agar senyawa besi atau mangan yang telah teroksidasi dan juga padatan tersuspensi (SS) yang berupa partikel halus, plankton dan lainnya dapat disaring. Dengan adanya filter multi media ini, zat besi atau mangan yang belum teroksidasi dapat dihilangkan sampai konsentrasi $<0,1$ mg/L. zat besi dan mangan ini harus dihilangkan terlebih dahulu karena zat-zat tersebut dapat menimbulkan kerak (*scale*) di dalam membran RO.

Dari filter multimedia, air dialirkan ke filter penghilangan warna. Filter ini mempunyai fungsi untuk menghilangkan warna senyawa dalam air baku yang dapat mempercepat penyumbatan membran RO. Setelah melalui filter penghilangan warna, air dialirkan ke filter cartridge yang dapat menyaring partikel dengan ukuran $0,5 \mu\text{m}$.

Setelah melalui filter cartridge, air dialirkan ke unit RO dengan menggunakan pompa tekanan tinggi sambil diinjeksi dengan zat anti kerak dan zat anti *biofouling*. Air yang keluar dari modul membran RO ada dua yakni air tawar dan air buangan garam yang telah dipekatkan (*reject water*). Selanjutnya air tawar dipompa ke tangki penampung sambil dibubuhi dengan khlorine dengan konsentrasi tertentu agar tidak terkontaminasi kembali

oleh mikroba, sedangkan air garamnya dibuang lagi ke laut (Said, 2003).

2.2.3 Karakteristik Air Buangan Osmosis Balik

Menurut Latteman dan Höpner (2008), menunjukkan bahwa semua proses desalinasi menghasilkan konsentrat dalam jumlah besar, yang dapat meningkatkan suhu, mengandung residu dari *pre-treatment* dan bahan kimia pembersih. Residu kimia dan produk sampingan biasanya terbawa ke laut bersama dengan konsentrat.

Efek negatif pada lingkungan laut dapat terjadi terutama ketika debit air limbah tinggi bertepatan dengan ekosistem yang ada di laut dalam kondisi sensitif. Dampak dari bangunan desalinasi pada ekosistem laut tergantung pada dua hal, sifat fisik-kimia dari aliran buangan dan keadaan hidrografi serta biologis dari badan penerima. Proses desalinasi dan pengolahan pendahuluan yang diterapkan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat fisik-kimia dari air buangan.

Tabel 2.1 menjelaskan bahwa salinitas air buangan *reverse osmosis* lebih tinggi daripada salinitas sumber air baku. Pada air buangan *reverse osmosis* terdapat kandungan residu *anti-scalant* dan *anti-fouling*, serta logam dari korosi biasanya juga ditemukan walaupun pada konsentrasi rendah. Koagulan juga dapat ditemukan jika air *backwash* dari koagulasi dan filtrasi sudah dikombinasikan dengan proses air limbah.

Tabel 2.1 Karakteristik Air Buangan *Reverse Osmosis* pada Bangunan Desalinasi Air Laut

Sifat Fisik

Salinitas	65.000 - 85.000 mg/L
Temperatur	Berkisar pada rata-rata temperatur air laut
DO	Jika menggunakan <i>well intake</i> : biasanya dibawah DO rata-rata air laut jika menggunakan <i>open intake</i> : berkisar pada rata-rata DO air laut

Penambahan biofouling dan produk sampingan

Chlorine	Jika klorin digunakan untuk mengendalikan <i>biofouling</i> , biasanya dinetralisir sebelum air memasuki membran untuk mencegah kerusakan membran
Halogen organik	Biasanya dibawah level bahaya
<i>Penghilang padatan tersuspensi</i>	
Koagulan	Dapat ditemukan apabila air <i>backwash</i> filter tidak diolah. Dapat menimbulkan pewarnaan pada efluen jika tidak diolah sebelum dibuang
<i>Penambahan bahan pengendali karat</i>	
Antiscalant	Biasanya dibawah level bahaya
Asam (H ₂ SO ₄)	Tidak ditemukan
<i>Penambahan bahan pengendali buih</i>	
Antifoaming	Tidak ditemukan
<i>Kontaminan dari korosi</i>	
Logam berat	Dapat terkandung pada konsentrasi tinggi untuk besi, kromium, nikel jika menggunakan <i>stainless steel</i> kualitas rendah
<i>Bahan kimia pembersih</i>	
Bahan kimia pembersih	Bersifat basa (pH 11-12) atau asam (pH 2-3) pada larutan dengan bahan tambahan seperti: deterjen, <i>complexing agents</i> , oksidator dan <i>biocides</i> .

Sumber: Latteman dan Höpner, 2008

Berdasarkan Diaratih (2015), pada PT PLN Pembangkit Kabupaten Jepara karakteristik air limbah atau *reject water* dari unit *reverse osmosis* terdapat pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Karakteristik air limbah *reverse osmosis*
PT PLN Pembangkit Kabupaten Jepara

Parameter	Hasil Analisa
Ph	7,43
TDS	36.330 g/L
Salinitas	45,87 ‰
Konduktivitas	72,68 mS/cm
Ca	1610 mg/L

Parameter	Hasil Analisa
Mg	2150 mg/L
K	1676 mg/L
Na	1650 mg/L
Ba	1575 mg/L
SO ₄	1150 mg/L
Cl	19400 mg/L

Sumber: Diaratih, 2015

2.2.4 Alternatif Pengolahan Limbah *Reverse Osmosis*

Pengelolaan limbah RO dari unit desalinasi dikondisikan terutama di lokasi unit. Limbah tersebut langsung dibuang ke laut dan biasanya dilakukan pada unit desalinasi yang terletak di daerah pesisir. Pada unit desalinasi yang terletak di daratan, alternatif pengolahan yang digunakan biasanya untuk mengurangi konsentrasi volume sebelum dibuang. Teknik evaporasi telah banyak diterapkan sebagai alternatif pengolahan limbah RO karena aplikasinya memungkinkan untuk mengolah limbah padat daripada mengolah limbah aslinya yaitu limbah cair (Pérez-González *et al.*, 2012).

Menurut Jeppesen *et al.* (2009), beberapa teknik pengolahan limbah RO telah diterapkan, diantaranya adalah injeksi pada sumur dalam dan kolam evaporasi. Elektrodialisis (ED), *vacuum membrane distillation* (VMD) dan *forward osmosis* (FO) juga dapat digunakan sebagai salah satu alternatif pengolahan limbah RO. Dibawah ini penjelasan masing-masing pengolahan

A. Injeksi Sumur Dalam

Metode ini dilakukan dengan cara membuang konsentrat ke dalam formasi batu berpori di bawah lapisan tanah. Pada unit desalinasi yang tergolong besar, metode ini tidak ekonomis untuk dilakukan. Desain dari injeksi sumur dalam secara umum dilakukan pada unit desalinasi dan melihat kondisi geologi dan hidrologi untuk menghindari pergerakan konsentrat menuju aliran air tanah (Jeppesen *et al.*, 2009).

B. Kolam Evaporasi

Kolam evaporasi lebih mudah untuk dibangun, perhatian operasional yang kecil dibandingkan pada kebutuhan mekanik dan pompa. Ukuran kolam terdiri dari dua komponen yaitu luas permukaan dan kedalaman. Kedalaman kolam berkisar antara 25 – 45 cm yang tergolong optimal untuk memaksimalkan tingkat evaporasi. Akan tetapi, kolam evaporasi hampir tidak digunakan karena membutuhkan lahan yang luas, terutama jika terletak pada lahan yang mempunyai tingkat evaporasi rendah, sedangkan berpotensi yang besar terhadap kontaminan air tanah jika terjadi retakan pada kolam evaporasi. Luas dari kolam berkisar antara 13,6-34,3 ha digunakan untuk pembuangan konsentrat RO di Saudi Arabia. Produksi air olahan tergolong rendah yaitu sekitar 4 L/m²hari (Pérez-González *et al.*, 2012).

Dengan adanya keterbatasan tersebut, teknik yang lebih sesuai dikembangkan dengan penambahan tingkat evaporasi menggunakan bantuan angin. *Wind Aided Intensified Evaporation* (WAIV) membutuhkan lahan yang lebih sedikit daripada kolam evaporasi tradisional. Teknik ini dapat meningkatkan efisiensi sebesar 50-90% relatif terhadap kolam evaporasi terbuka. Teknik WAIV selanjutnya akan dikembangkan untuk mendapatkan garam olahan yang dapat digunakan untuk bahan produksi (Pérez-González *et al.*, 2012).

C. Metode Elektrodialisis

Pengaplikasian elektrodialisis (ED) terhadap konsentrat RO dapat meningkatkan konsentrasi garam dari 0,2-2% menjadi 12-20% dengan kebutuhan energi 1-7 kWh/m³. Hal ini kontras dengan kebutuhan energi yang dibutuhkan kolam evaporasi yaitu sebesar 25 kWh/m³. Pada operasi elektrodialisis terdapat dua permasalahan terbesar, pertama adalah mencari larutan untuk mengoperasikan konsentrasi sampai 20% dari garam tanpa efisiensi energi yang berkurang. Permasalahan kedua adalah menghindari terjadinya presipitasi CaSO₄ pada membran. *Scaling* pada elektrodialisis dapat dihindari dengan asidifikasi, dan mengoperasikan elektrodialisis pada mode terbalik yaitu *elektrodialysis reversal* (Pérez-González *et al.*, 2012).

D. **Vacuum Membrane Distillation**

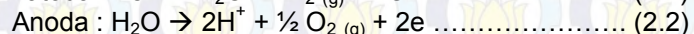
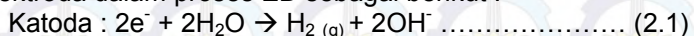
Metode ini merupakan teknik evaporasi dengan bantuan membran. Keuntungan utama dari metode ini adalah beroperasi pada temperatur tinggi, sekitar 60-80°C dan penggunaan membran dapat meningkatkan area kontak per unitnya. Akan tetapi dapat terjadi *scaling* dari kalsium yang terkandung pada konsentrat RO. Pada air yang bersalinitas tinggi sering terjadi adanya *scaling* sehingga efektifitas pengolahan menurun (Pérez-González *et al.*, 2012).

2.3 **Elektrodialisis**

2.3.1 **Prinsip Kerja Elektrodialisis**

Elektrodialisis adalah proses pemisahan ion menggunakan membrane tukar ion yaitu membrane tukar anion dan kation yang bersifat permeabel berupa lembaran dari resin tukar ion atau yang mengandung polimer, hal ini berfungsi untuk memperbaiki kekuatan mekanik dan fleksibilitas. Ion-ion berpindah dari larutan satu ke larutan lain yang melewati membrane karena adanya perbedaan tegangan listrik. Ion positif (kation) akan bergerak menuju katoda (elektroda yang bermuatan negatif), sedangkan ion negatif (anion) akan bergerak menuju anoda (elektroda yang bermuatan positif). Pada Gambar 2.6 dijelaskan bagaimana ion bergerak pada unit elektrodialisis.

Dalam aplikasi ED dapat dilakukan secara kontinyu maupun *batch*. Dalam proses kontinyu, air influen dialirkan melalui sejumlah bilik secara seri menghasilkan produk seperti yang diinginkan. Dalam proses *batch* influen diresirkulasi melalui system elektrodialisis sampai diperoleh produk akhir dengan hasil yang diinginkan, misalnya konsentrasi produk. Pada ED terjadi proses reaksi oksidasi dan reduksi. Reaksi oksidasi adalah reaksi suatu zat dengan oksigen atau reaksi pelepasan elektron. Reaksi reduksi adalah reaksi pelepasan oksigen dari suatu zat atau reaksi menerima elektron (Strathmann, 2004). Reaksi yang terjadi pada elektroda dalam proses ED sebagai berikut :

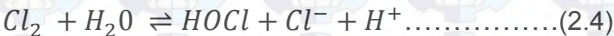


H₂, Cl₂, dan O₂ dapat terbentuk dari hasil oksidasi pada kompartemen anoda (Van der Bruggen, 2015). Pada kompartemen anoda terjadi proses oksidasi yang menyebabkan

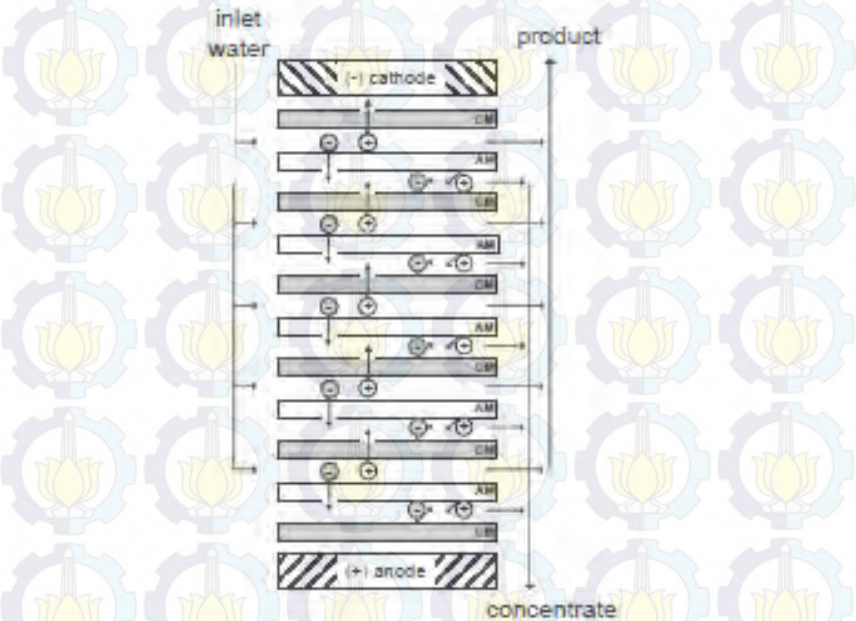
ion Cl^- teroksidasi menjadi Cl_2 (Pretz *et al.*, 1999). Proses yang terjadi pada anoda adalah sebagai berikut :



Reaktivitas klorin tergantung pada kondisi pH larutan. Pada $pH < 3$, gas klor lebih banyak dihasilkan dibanding senyawa klorin yang lain. Pada rentang $pH 3-7,5$ klorin yang dihasilkan kebanyakan adalah asam hipoklorit ($HOCl$), meskipun gas klor dapat terbentuk tetapi dalam kandungan yang kecil (Deborde dan Gunten, 2008).

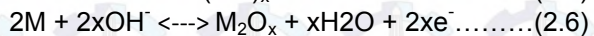
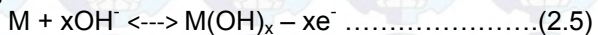


Menurut persamaan 2.4 diketahui gas klor (Cl_2) berubah menjadi asam hipoklorit. Gas klor akan bereaksi dengan ion organik maupun inorganik sehingga menjadi senyawa klorin yang lain.

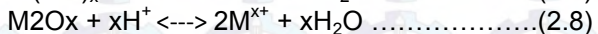
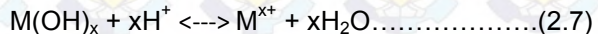


Gambar 2.6 Prinsip kerja elektrodialisis (Valero *et al.*, 2011)

Pada anoda biasanya terkorosi dengan melepaskan elektron-elektron dari atom logam netral untuk membentuk ion-ion yang bersangkutan. Ion-ion tersebut kemungkinan berada dalam larutan atau bereaksi membentuk hasil korosi yang tidak larut. Reaksi ini bisa menghalangi pelarutan logam lebih lanjut sehingga korosi berhenti. Berdasarkan Van der Bruggen (2015), pada anoda terjadi korosi karena adanya formasi oksida di permukaan elektroda, yang dapat terlarut dan dapat menyebabkan suasana asam. Persamaan reaksi dengan logam M adalah sebagai berikut:



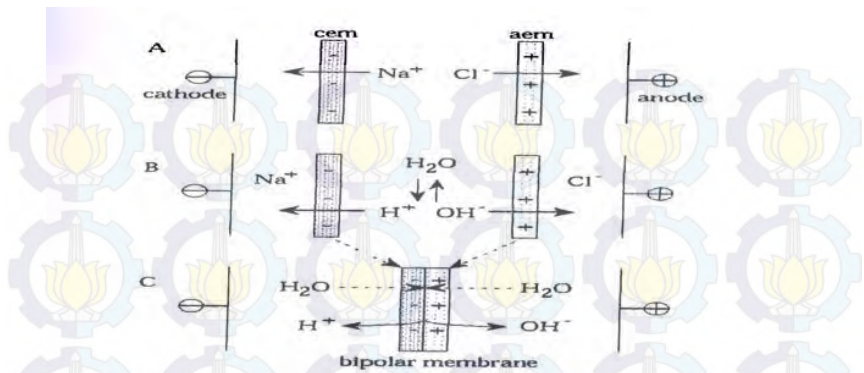
Karena konsumsi ion OH^- telah hilang maka ion logam yang terlarut adalah:



Katoda biasanya tidak mengalami korosi, walaupun mungkin terjadi kerusakan dalam kondisi-kondisi tertentu. Dua reaksi yang penting dan umum mungkin terjadi pada katoda bergantung pada pH larutan yang bersangkutan. Proses tersebut akan terjadi jika perubahan energinya besar. Bila larutan garam logam yang bereaksi, maka dapat terjadi pengendapan logam atau garam pada katoda dan timbulnya gas H_2 . Kedua proses tersebut dipengaruhi oleh besarnya potensial yang diperlukan untuk dekomposisi logam atau timbulnya gas H_2 (Valero *et al.*, 2011)

2.3.2 Membran Bipolar

Di samping membran monopolar (membran penukar kation dan membran penukar anion), pada satu dekade terakhir telah dikembangkan suatu membran penukar ion yang memiliki karakteristik yang khas, disebut dengan membran bipolar. Membran bipolar adalah suatu membran yang memiliki lapisan permeabel terhadap kation di satu sisi, dan lapisan permeabel anion di sisi yang lain. Prinsip kerja dari membran bipolar dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Prinsip kerja membran bipolar
(Sutrisna, 2002)

Pada Gambar 2.7 terlihat suatu membran penukar kation dan membran penukar anion yang diletakkan di antara anoda dan katoda. Ketika arus listrik dilewatkan ke dalam sistem, ion – ion akan bergerak melewati membran penukar ion menuju elektroda yang memiliki muatan berlawanan dengan ion tersebut (hal yang sama seperti pada kompartemen diluat dari suatu sel elektrodialisis). Pada saat semua ion telah dipindahkan dari ruang antar membran tersebut, arus listrik hanya dapat dibangkitkan oleh proton (H^+) dan ion hidroksil (OH^-) yang terdapat dalam air deionisasi yang lewat di antara membran penukar ion. Fenomena terpecahnya molekul air (H_2O) ini disebut sebagai peristiwa *disosiasi air* atau *water splitting*. Konduktivitas air deionisasi sangat rendah dan untuk mengurangi hambatan listrik yang tinggi dalam ruang antar membran ini maka membran penukar kation dan membran penukar anion diletakkan berdekatan satu sama lain, sehingga membentuk membran bipolar.

Ion H^+ dan ion OH^- yang dihasilkan oleh adanya fenomena *disosiasi air* dalam membran bipolar ini akan terdorong keluar akibat adanya arus listrik yang dibangkitkan oleh external power supply melewati kedua elektroda, anoda dan katoda. Membran bipolar harus memenuhi beberapa persyaratan sebagai berikut:

- 1 Memiliki kemampuan yang tinggi untuk mendisosiasi air,
- 2 Memiliki ikatan yang kuat di antara kedua lapisan yang permeabel kation dan anion,

- 3 Memiliki lapisan yang tipis antara kedua lapisan untuk mengurangi penurunan voltase akibat terjadinya polarisasi konsentrasi,
- 4 Memiliki hambatan listrik yang rendah pada densitas arus yang tinggi,
- 5 Memiliki permselektivitas yang tinggi, memiliki kekuatan mekanik dan kestabilan kimia yang baik.

2.3.3 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Kinerja Elektrodialisis

Dalam proses ED terdiri dari beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja elektrodialisis. Menurut Huang *et al* (2007), dalam aplikasi ED terdiri atas empat komponen, yaitu :

A. DC Supply

Direct Current suplai (DC supply) merupakan cara efektif untuk mempercepat perpindahan ion, yaitu kation dan anion akan berpindah ke arah katoda dan anoda. Perpindahan ion dapat dilakukan dengan mengatur kuat arus. Arus DC merupakan arus searah yang digunakan dalam proses ED.

B. Elektroda

Reaksi oksidasi/reduksi di anoda dan katoda yang menunjukkan bahwa ada perpindahan ion dari kation ke katoda yang didorong oleh arus listrik. Menurut Riyanto (2013), elektroda adalah konduktor yang digunakan untuk mengalirkan arus listrik dalam sel elektrolisis. Elektroda terdiri atas dua jenis yaitu elektroda inert dan tidak inert (aktif). Elektroda inert adalah elektroda yang tidak bereaksi sebagai katoda maupun anoda, sehingga dalam elektrolisis yang mengalami reaksi redoks adalah elektrolit sebagai zat terlarut atau air sebagai pelarut. Contoh elektroda inert adalah karbon (C), dan platina (Pt). Sedangkan elektroda aktif adalah elektroda yang ikut bereaksi terutama jika digunakan sebagai anoda karena akan mengalami reaksi oksidasi. Contoh elektroda aktif adalah besi (Fe), aluminium (Al), tembaga (Cu), seng (Zn), perak (Ag), dan emas (Au). Elektroda memiliki kriteria yang dapat dilihat dari deret voltanya. Berikut susunan lengkap deret volta pada logam :

Li-K-Ba-Sr-Ca-Na-Mg-Al-Mn-Zn-Cr-Fe-Cd-Co-Ni-
Sn-Pb-H⁺-Cu-Hg-Ag-Pt-Au

Logam-logam yang terletak di sebelah kiri H^+ memiliki E°_{red} negatif. Semakin ke kiri, maka nilai E°_{red} semakin kecil (semakin negatif). Hal ini menandakan bahwa logam-logam tersebut semakin sulit mengalami reduksi dan cenderung mengalami oksidasi. Oleh sebab itu, kekuatan reduktor akan meningkat dari kanan ke kiri. Hal ini menunjukkan bahwa logam-logam tersebut semakin mudah mengalami reduksi dan sulit mengalami oksidasi. Dari penjelasan tentang deret volta diatas dapat dikatakan bahwa :

- Semakin ke kanan, semakin mudah direduksi dan sukar dioksidasi.
- Semakin ke kiri semakin mudah dioksidasi dan sukar direduksi.

Pada proses ED elektroda yang digunakan terdiri atas elektroda dengan muatan negatif (katoda). Perbedaan muatan kutub pada elektroda berfungsi sebagai pengikat ion-ion bermuatan positif dan negatif yang terdapat pada larutan influen (Volero *et al.*, 2011)

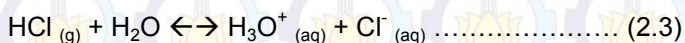
C. *Ion Exchange Membrane*

Terdapat dua jenis *ion exchange membrane* yang dapat diterapkan di ED kombinasi ataupun terpisah. Dua diantaranya adalah membrane kation dan anion yang merupakan membrane mono-polar. *Cation exchange membrane* (CEM) merupakan membran yang melewatkan ion positif sedangkan *anion exchange membrane* (AEM) merupakan membran yang melewatkan ion negative. Kedua membran tersebut memiliki hambatan listrik rendah, tidak larut dalam air, tahan terhadap pH (1-10), mudah pengantiannya, dapat digunakan pada suhu hingga $46^{\circ}C$, tahan terhadap tekanan osmosis, tahan lama terhadap potensi penyumbatan dan mudah dibersihkan. Membran tersebut sangat selektif terhadap ion-ion yang lewat, sehingga mampu menahan ion-ion yang seharusnya tidak melewati membran tersebut (Volero *et al.*, 2011).

D. Pelarut dan larutan

Menurut Riyanto (2013), elektrolit adalah zat yang terlarut dalam bentuk ion-ion. Zat yang jumlahnya lebih sedikit di dalam larutan disebut zat terlarut atau *solute*, sedangkan zat yang jumlahnya lebih banyak dalam larutan disebut pelarut

atau *solvent*. Komposisi zat terlarut dinyatakan dalam konsentrasi larutan. Larutan terdiri atas larutan elektrolit yang mudah menghantarkan listrik, dan larutan non elektrolit yang tidak dapat menghantarkan listrik. Ion-ionnya merupakan atom-atom yang bermuatan elektrik seperti senyawa garam atau asam. Senyawa elektrolit adalah senyawa yang memiliki ikatan ion dan kovalen polar. Sebagian besar senyawa yang berikatan ion merupakan elektrolit. Contoh garam dapur (NaCl) dalam bentuk larutan dan lelehan dapat menjadi larutan elektrolit, namun dalam padatan senyawa ion tidak dapat berfungsi sebagai elektrolit. Apabila senyawa ion berdisosiasi dalam air, maka ion-ionnya akan terhalang oleh molekul-molekul air sehingga akan terhidrasi. Terbentuknya ion-ion dalam bentuk larutan tidak hanya untuk senyawa ion saja. Contoh HCl bila dilarutkan dalam air akan terjadi reaksi sebagai berikut :



Reaksi tersebut disebut reaksi ionisasi karena menghasilkan ion-ion yang sebelumnya tidak ada (terdisosiasi). Reaksi terjadi karena adanya perpindahan proton atau hydrogen (H^+) dari molekul HCl ke molekul air menghasilkan ion hydronium (H_3O^+) dan ion klorida (Cl^-). Sehingga walaupun hidrogen klorida murni berada sebagai molekul yang kelistrikannya netral (cairan HCl tak menghantarkan listrik), bila dilarutkan dalam air akan terjadi reaksi kimia dan menghasilkan ion dan menjadi suatu elektrolit (Brady, 1999).

2.4 Hukum Ohm

Hubungan antara beda potensial dalam elektrolit dan kekuatan arus listrik yang mengalir menurut Hukum Ohm yaitu,

$$I = \frac{V}{R} \dots\dots\dots (2.4)$$

Besarnya listrik yang mengalir dinyatakan dengan coulomb adalah sama dengan arus listrik yang dikalikan dengan waktu.

$$Q = I \times t \dots\dots\dots (2.5)$$

Dimana:

- I = Kuat arus listrik (A)
 V = Beda Potensial (V)
 R = Hambatan (ohm)
 Q = Muatan listrik (coulomb)
 t = waktu (detik)

Berdasarkan Topayung (2011), kuat arus listrik dan tegangan berbanding lurus, jika arus listrik yang dialirkan besar maka tegangan yang digunakan juga akan semakin besar. Selain itu, arus listrik mempunyai korelasi terhadap reaksi elektron yang ada pada elektrolit. Semakin besar kuat arus listrik yang digunakan pada elektrolisis, maka akan menyebabkan elektron lebih reaktif sehingga mudah bergerak. Hal ini juga akan menyebabkan porsi akumulasi pergerakan elektron dan transfer material pada kedua elektroda semakin besar.

2.5 Kebutuhan Energi

Berdasarkan Anglada *et al.* (2009), muatan listrik spesifik direpresentasikan sebagai penurunan konsentrasi polutan selama proses elektrokimia. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$Q = \frac{I \cdot A \cdot t}{v} \dots\dots\dots(2.6)$$

$$J = \frac{I}{A} \dots\dots\dots(2.7)$$

$$Q = \frac{I \cdot t}{v} \dots\dots\dots(2.8)$$

$$W = Q \cdot V \dots\dots\dots(2.9)$$

Keterangan:

- | | |
|--------------------------------|-----------------------|
| W = konsumsi energi spesifik | (kWh/m ³) |
| Q = muatan listrik spesifik | (kAh/m ³) |
| I = kuat arus listrik | (A) |
| J = kerapatan arus | (A/m ²) |
| V = tegangan listrik | (V) |
| A = luas elektroda | (m ²) |
| t = waktu operasi | (s) |
| v = volume elektrolit | (L) |
| Kerapatan arus listrik | (J) |

2.6 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu digunakan sebagai referensi dalam penelitian ini, dan berfungsi untuk mempermudah pelaksanaan penelitian ini. Selain itu, penelitian terdahulu dapat digunakan sebagai pembandingan. Beberapa penelitian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Penelitian terdahulu

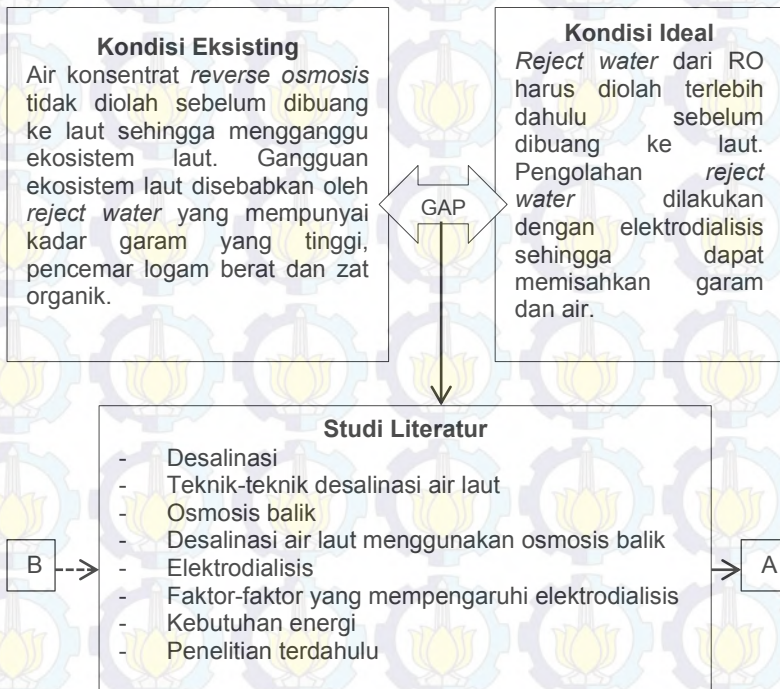
Penulis	Hasil
Korngold <i>et al.</i> , 2009	Penelitian dilakukan dengan voltase 0,5-1 V dan rapat arus sebesar 10-27 mA/cm ² dapat meningkatkan konsentrasi <i>brine water</i> (Na) hingga 84% dari 142,3 menjadi 913 mg/L dengan td 42 jam. Sistem <i>batch</i> dijalankan selama 6 jam per hari dengan luas permukaan membran sebesar 225 cm ²
Elazhar <i>et al.</i> , 2014	Sistem <i>batch</i> digunakan dalam penelitian ini dengan menggunakan platina sebagai anoda
Gao <i>et al.</i> , 2009	Penelitian menggunakan tiga kompartemen dengan isi kompartemen adalah larutan asam, larutan basa dan larutan garam. Rapat arus yang digunakan adalah berkisar antara 1-12 mA/cm ²
Zhang <i>et al.</i> , 2012	Variasi rapat arus adalah sebesar 1,3,5,7 dan 9 mA/cm ² dengan variasi debit 3, 8, 12, 16, dan 20 L/jam. Hasil penurunan garam tertinggi yaitu 81% terdapat pada rapat arus 5 mA/cm ² dengan debit 3 L/jam
Mirfada, 2014	Penelitian dilakukan dengan variasi tegangan sebesar 6 V, 9 V, 12 V dan jumlah kompartemen sebanyak lima dan tujuh kompartemen. Pada tegangan 6 V dan tujuh kompartemen didapat penurunan TDS yang optimal yaitu 92%

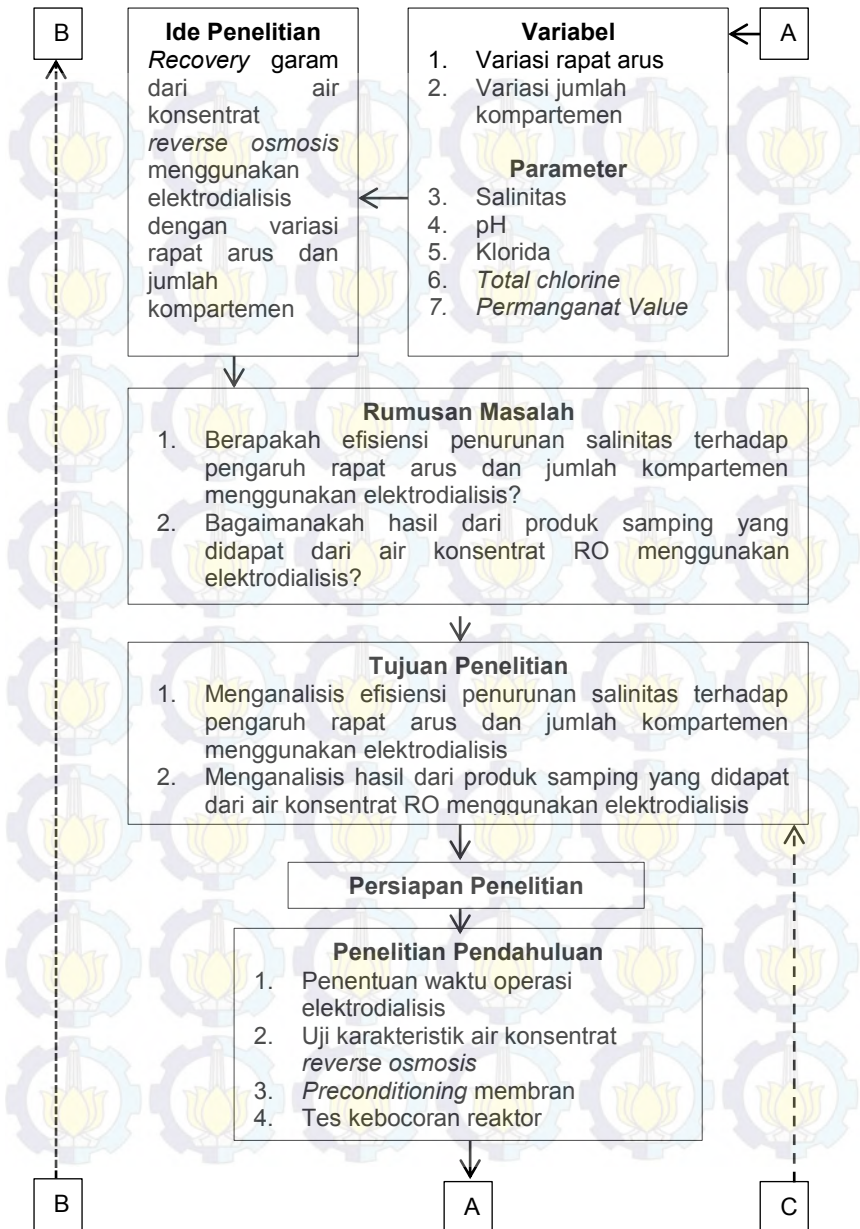
Sumber: Korngold *et al.*, 2009; Elazhar *et al.*, 2014; Gao *et al.*, 2009; Mirfada, 2014; dan Zhang *et al.*, 2012

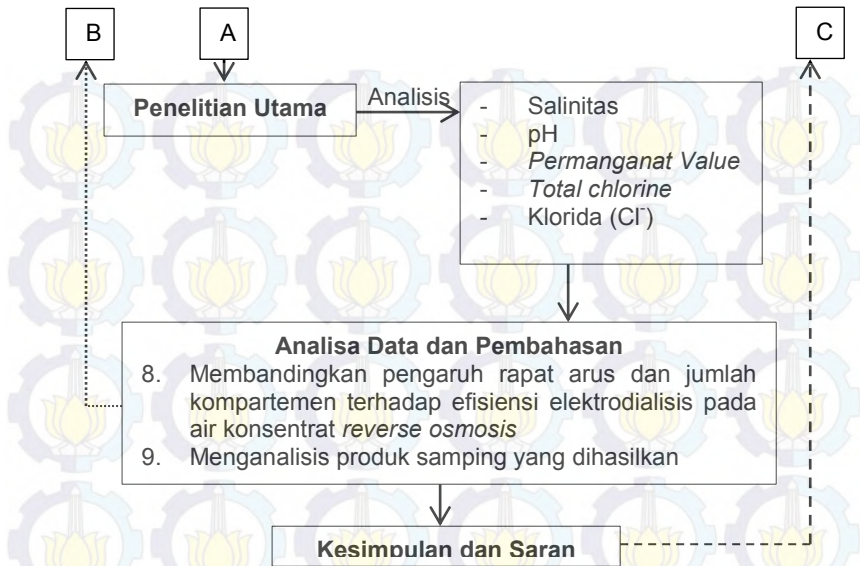
BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian disusun berdasarkan analisis perbedaan (gab) antara kondisi eksisting dan kondisi ideal, yang diantaranya adalah tidak adanya pengolahan air konsentrat *reverse osmosis* sehingga mengganggu ekosistem laut. Konsentrat tersebut ditujukan untuk diambil kandungan garamnya kembali. Kerangka penelitian ini mencakup penelitian pendahuluan berupa penentuan waktu operasi elektrodialisis dan penelitian utama berupa variasi rapat arus dan jumlah kompartemen terhadap efisiensi elektrodialisis. Pada Gambar 3.1 dijelaskan kerangka penelitian dari ide yang telah dibuat.







Gambar 3.1 Kerangka Penelitian

3.2 Studi Literatur

Studi literatur berasal dari jurnal internasional, jurnal nasional, *text book*, dan penelitian terdahulu. Studi literatur yang dibutuhkan untuk membantu penelitian adalah desalinasi, teknik desalinasi, osmosis balik, dan prinsip elektrodialisis.

3.3 Ide Penelitian

Hal yang pertama kali dilakukan adalah menemukan ide yang berasal dari permasalahan yang ada disekitar kita berdasarkan kondisi saat ini. Kemudian dibandingkan dengan kondisi ideal. Kondisi saat ini atau kondisi eksisting yang ada adalah tidak ada pengolahan untuk air konsentrat *reverse osmosis* sehingga air konsentrat tersebut mencemari badan air penerima yaitu laut. Kondisi ideal seharusnya terdapat pengolahan lanjutan untuk meminimisasi konsentrat *reverse osmosis*. Sehingga diperoleh ide penelitian yaitu *recovery* garam dari air konsentrat *reverse osmosis* menggunakan elektrodialisis dengan variasi rapat arus dan jumlah kompartemen.

3.4 Penentuan Variabel dan Parameter

Variabel yang digunakan pada penelitian ini ada dua aspek, antara lain:

1. Variabel rapat arus

Berdasarkan penelitian Zhang *et al.* (2012), rapat arus yang divariasikan adalah sebesar 1 - 9 mA/cm². Sehingga variasi yang digunakan adalah 1 mA/cm²; 1,5 mA/cm²; 2 mA/cm² dan 2,5 mA/cm².

2. Variabel jumlah kompartemen

Jumlah kompartemen mempengaruhi luas permukaan kontak dalam pengolahan elektrodialisis. Jumlah kompartemen yang digunakan adalah 3 kompartemen dan 5 kompartemen mengacu pada penelitian Gao *et al.* (2009), yang menggunakan tiga kompartemen serta Mirfada (2014), yang menggunakan lima kompartemen dan tujuh kompartemen.

Pengujian parameter dilakukan dengan cara yang tercantum pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Metode Pengukuran Setiap Parameter

No.	Parameter	Metode	Instrumen Utama
1	Salinitas	Salinometri	pH ion lab tipe EC10
2	pH	Potensiometri	pH meter Eutech tipe 510
3	Klorida	Argentometri	Buret pyrex Fortuna Germany
4	Total chlorine	DPD	Spektrofotometer
5	Nilai permanganat	Redoks	Buret pyrex Fortuna Germany

Sumber: SK SNI Departemen Pekerjaan Umum tentang Kualitas Air tahun 1990

3.5 Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian meliputi dua hal, antara lain:

A. Penelitian Pendahuluan

1. Uji karakteristik air konsentrat *reverse osmosis* dengan parameter nilai pH, konsentrasi TDS, dan salinitas
2. Persiapan membran atau *preconditioning* membran dilakukan dengan cara merendam membran kedalam

larutan 5% NaCl selama 24 jam pada suhu 40°C. Hal ini diperlukan agar membran dapat terhidrasi dan tereksansi sehingga dapat digunakan secara efektif

3. Tes kebocoran dilakukan untuk melihat kondisi reaktor sehingga pada saat melakukan penelitian tidak terganggu adanya kebocoran pada reaktor. Biasanya reaktor akan dialiri air biasa atau aquades untuk melihat rembesan yang terjadi.

B. Persiapan Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Reaktor dengan sistem *batch*

Reaktor yang digunakan dalam penelitian ini berbahan akrilik karena bersifat inert terhadap bahan kimia, stabil terhadap panas, tahan korosi, dapat direkatkan dan dapat didesain dengan berbagai bentuk. Reaktor berbentuk persegi panjang dengan dimensi 6 cm x 14 cm x 24 cm (panjang x lebar x tinggi) untuk jumlah kompartemen 3 dan 10 cm x 14 cm x 24 cm untuk jumlah kompartemen 5. Reaktor terdiri kompartemen, lapisan penjepit, dan karet ban. Konfigurasi dan bentuk reaktor dapat dilihat pada Gambar 3.2 dan Gambar 3.3. Konfigurasi reaktor lima kompartemen dapat dilihat pada lampiran C Gambar 1.

2. Membran

Membran yang digunakan adalah *cation exchange membrane* (CEM/+) dan *anion exchange membrane* (AEM/-) dengan dimensi 12 cm x 22 cm. spesifikasi *anion exchange membrane* (AEM/-) yaitu tipe AMI-7001 sedangkan *cation exchange membrane* (CEM/+) yaitu tipe CMI-7000. Luas membran efektif adalah 20 cm x 10 cm (200 cm²).

3. Elektroda

Bahan yang digunakan untuk elektroda yaitu anoda dan katoda adalah platinum dan *stainless steel* dengan luas permukaan 18 cm². Anoda platinum menggunakan bekas pen sedangkan katoda *stainless steel* berbentuk lempeng dengan dimensi 2 cm x 9 cm.

4. Kabel

Kabel yang digunakan terbuat dari silikon yang tahan terhadap asam kuat dan basa kuat.

5. Pompa

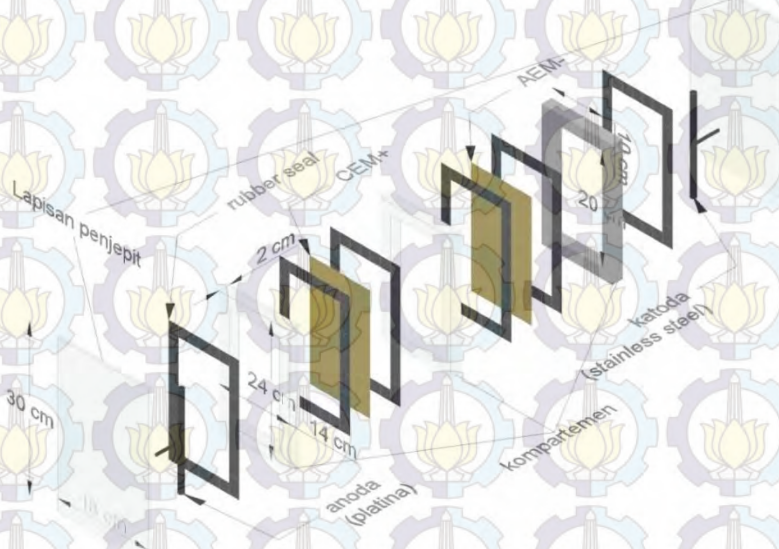
Pompa yang digunakan adalah jenis pompa dengan debit pemompaan sebesar 250 L/jam.

6. DC adjustable power supply

DC adjustable power supply yang digunakan adalah dengan arus listrik dengan range 0-3 A dan tegangan dengan range sebesar 0-30 V. Alat ini berfungsi sebagai sumber arus listrik pada proses ED. Gambar pada lampiran C Gambar 2.

Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah:

1. Air konsentrat *reverse osmosis* PJB UP Jepara
2. Aquades, berfungsi sebagai *flushing*, untuk mendapatkan ion-ion yang telah disisihkan dari air konsentrat RO.



Gambar 3.2 Konfigurasi reaktor ED

DC adjustable
power supply

feed tank
6 L

aquades
4 L

3 kompartemen

DC adjustable
power supply

feed tank
7 L

aquades
4 L

5 kompartemen

Gambar 3.3 Sistem elektrodialisis dengan tiga dan lima kompartemen

3.6 Penelitian Utama

Variasi yang diuji adalah arus listrik dengan tiga variasi dan jumlah kompartemen dengan dua variasi. Pada masing-masing reaktor dilakukan analisis salinitas, pH, kandungan Cl^- , nilai permanganat serta *total chlorine*. Pada Tabel 3.2 menjelaskan tentang jumlah reaktor uji dengan variasi pada masing-masing variabel.

Tabel 3.2 Variasi Reaktor Uji

Jumlah kompartemen	Rapat arus			
	1 mA/cm^2	1,5 mA/cm^2	2 mA/cm^2	2,5 mA/cm^2
3 buah	R1	R2	R3	R4
5 buah	R5	R6	R7	R8

Tahapan penelitian utama adalah sebagai berikut:

1. Mengisi bak penampung (*feed tank*) dengan air baku yaitu air konsentrat *reverse osmosis* sebanyak 6-7 L.
2. Mengisi bak penampung aquades sebanyak 4 L.
3. Menyalakan pompa untuk mengalirkan air konsentrat dengan debit 22,5 L/jam, dan aquades dengan debit 750 L/jam sampai reaktor ED penuh pada tiap kompartemennya.
4. Menyalakan DC adjustable power supply untuk memberikan arus listrik sebesar 0,2 A; 0,3 A; 0,4 A; 0,5 A untuk reaktor dengan jumlah kompartemen 3 dan 5. Besar arus listrik didapatkan dari konversi mA/cm^2 ke A (ampere) dengan luas membran sebesar 200 cm^2 .
5. Melakukan uji parameter yang terdiri dari analisis salinitas, pH, nilai permanganat, kandungan klorida dan *total chlorine* pada *feed tank* saat t_1 - t_{10} .
6. Melakukan uji parameter gas Cl_2 pada tengah dan akhir operasi, sedangkan nilai permanganat pada awal, tengah dan akhir operasi.

Prinsip kerja reaktor elektrodialisis adalah sebagai berikut:

1. Air konsentrat *reverse osmosis* dialirkan pada kompartemen anoda dan katoda

2. Kation pada kompartemen anoda akan bermigrasi ke kompartemen tengah
3. Anion pada kompartemen katoda akan bermigrasi ke kompartemen tengah
4. Pada kompartemen anoda terjadi oksidasi, sehingga terbentuk Cl_2
5. Pada kompartemen katoda terjadi reduksi, sehingga terbentuk H_2

3.7 Analisa Data dan Pembahasan

Variasi rapat arus dan jumlah kompartemen akan dianalisis terhadap efisiensi perpindahan ion pada air konsentrat *reverse osmosis*. Analisis yang akan dilakukan dalam penelitian ini diantaranya:

1. Membandingkan pengaruh rapat arus dan jumlah kompartemen terhadap efisiensi elektrodialisis pada air konsentrat *reverse osmosis* dengan analisa *anova-two ways with replication*.
2. Menganalisis produk samping yang dihasilkan.

3.8 Kesimpulan dan Saran

Kesimpulan yang ingin didapatkan adalah pengaruh rapat arus dan jumlah kompartemen terhadap penurunan salinitas dan seberapa besar hasil samping yang didapat. Saran yang akan ditulis adalah untuk menunjang penelitian selanjutnya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Penelitian Pendahuluan

4.1.1 Karakteristik Air Konsentrat *Reverse Osmosis*

Uji karakteristik awal konsentrat RO dilakukan dengan analisa TDS, salinitas, pH dan nilai permanganat (PV). Analisa dilakukan di Jurusan Teknik Lingkungan ITS Surabaya. Karakteristik awal konsentrat *reverse osmosis* dapat dilihat pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Karakteristik Awal Air Konsentrat *Reverse Osmosis*

No.	Parameter	Hasil
1	TDS	28 mg/l
2	Salinitas	34,2 ppt
3	pH	6,97
4	pV (nilai permanganat)	284,4 mg/l

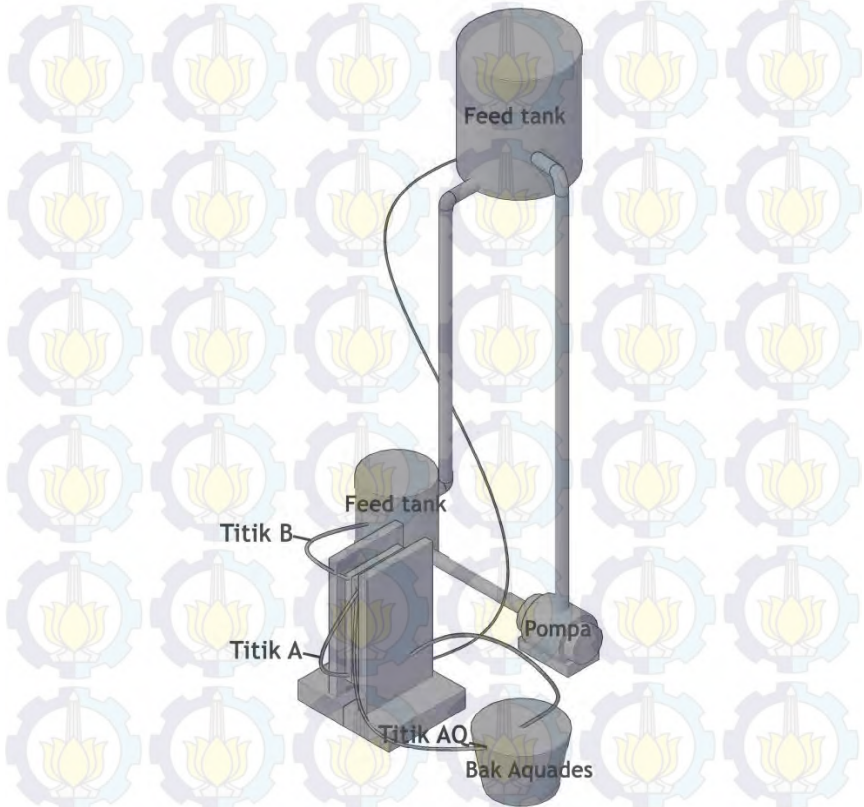
4.1.2 Penentuan Waktu Operasi Elektrodialisis

Penelitian pendahuluan dilakukan untuk menentukan waktu operasi yang diperlukan saat melakukan elektrodialisis pada penelitian utama. Debit yang digunakan adalah 22,5 L/jam. Arus listrik yang digunakan sebesar 0,5 A untuk mengetahui perubahan yang terjadi pada elektroda terutama anoda. Volume sampel pada *feed tank* digunakan sebesar 8 liter sedangkan pada bak aquades sebesar 4 liter.

Penelitian dilakukan selama 36 jam dengan pengambilan sampel setiap 3 jam sekali sampai 24 jam dan diambil sekali lagi pada saat 36 jam. Parameter yang diuji adalah TDS, salinitas dan pH. Voltase pada saat penelitian juga diukur untuk mengetahui kinerja elektrodialisis dalam proses tukar ion kation dan anion.

Reaktor yang digunakan menggunakan tiga kompartemen yang terdapat membran penukar kation dan anion. Elektroda yang digunakan adalah platina sebagai anoda dan *stainless steel* sebagai katoda. Air konsentrat RO akan dialirkan pada kompartemen anoda dan katoda, setelah itu kembali ke *feed tank*. Air aquades dialirkan pada kompartemen tengah dengan pompa *submersible* yang digunakan sebagai media untuk penukar ion kation dan anion sehingga lama kelamaan semakin pekat dengan kation dan anion yang berupa garam. Titik

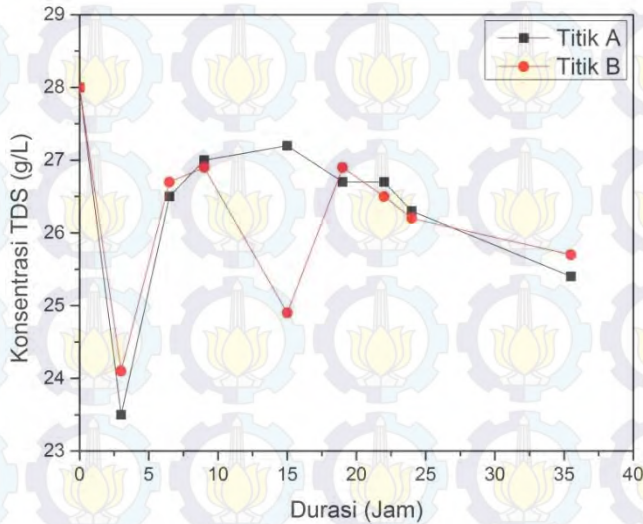
pengambilan sampel dilakukan di 3 titik yaitu A pada outlet kompartemen anoda, B pada outlet kompartemen katoda dan AQ yaitu pada aquades. Sistem pengaliran air dan pengambilan sampel paket reaktor elektrodialisis yaitu pompa, reaktor, dan bak dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah dan pada Lampiran C gambar 3.



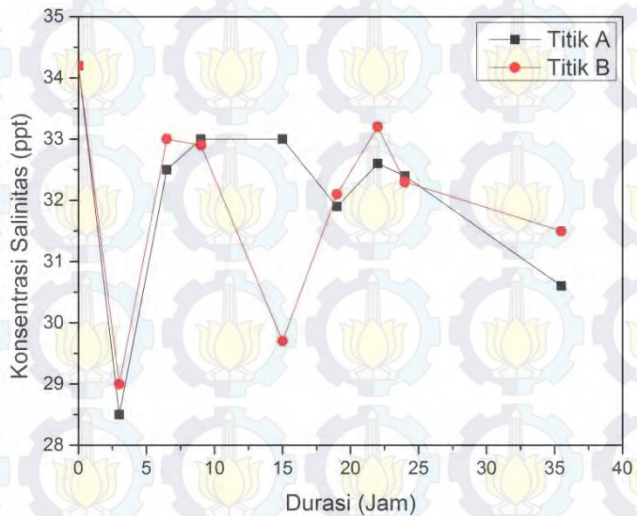
Gambar 4.1 Sistem Reaktor Elektrodialisis dan Titik Pengambilan Sampel

Perubahan nilai TDS dan salinitas pada titik A, B dan aquades ditampilkan pada gambar 4.2, 4.3 dan 4.4 sehingga

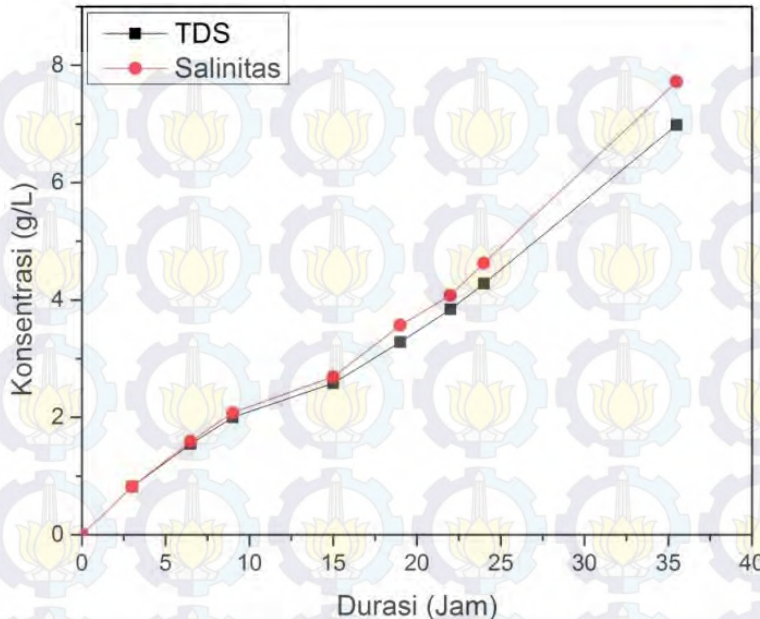
dapat menunjukkan kecenderungan perubahan TDS dan salinitas. Data dapat dilihat pada Lampiran A Tabel 1 dan 2.



Gambar 4.2 Penurunan TDS



Gambar 4.3 Penurunan Salinitas



Gambar 4.4 Nilai TDS dan Salinitas pada Aquades

Pada kompartemen anoda terjadi peluruhan atau korosi pada anoda. Peluruhan menyebabkan air limbah RO berwarna coklat kemerahan karena adanya ion logam yang terlarut. Ion besi (Fe^{++}) menyebabkan warna larutan menjadi merah, kuning dan orange (Charrete dan Sholkovitz, 2002). Proses peluruhan anoda terjadi karena teroksidasi sehingga mengalami korosi mengakibatkan terjadinya perubahan warna pada air limbah yang semula bening keruh menjadi coklat keruh. Berdasarkan persamaan 2.5; 2.6; 2.7 dan 2.8; ion logam mampu bereaksi dengan larutan. Menurut Van der Bruggen (2015), pada anoda terjadi korosi karena adanya formasi oksida di permukaan elektroda, yang dapat terlarut dan dapat menyebabkan suasana asam.

Munculnya presipitat warna coklat kemerahan seperti pada lampiran C gambar 4 juga terjadi. Gambar peluruhan pada proses penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.5. Berdasarkan hal tersebut diketahui bahwa logam yang terkorosi adalah besi.

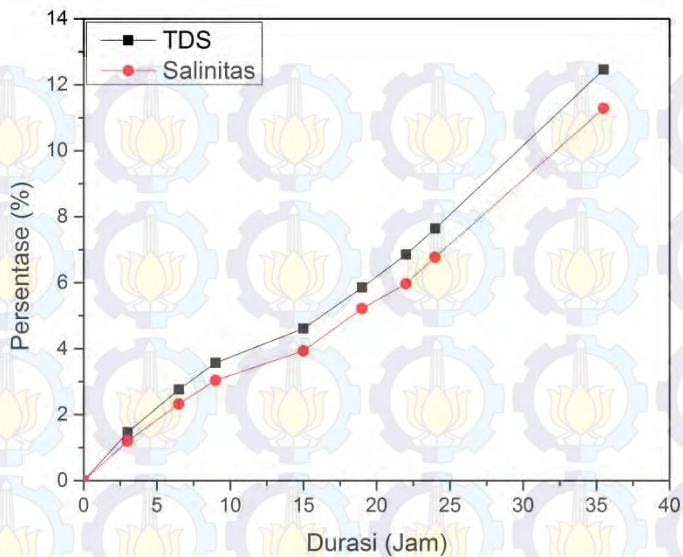
Anoda yang digunakan adalah pen bekas operasi patah tulang sehingga adanya campuran yang menyebabkan plat tersebut tidak murni platina.

Sedangkan pada Gambar 4.4 aquades konsisten naik pada parameter TDS dan salinitas, sehingga dapat diketahui terjadi proses penarikan kation dan anion yang terkumpul di aquades. Kation dan anion tersebut merupakan garam dari air limbah.

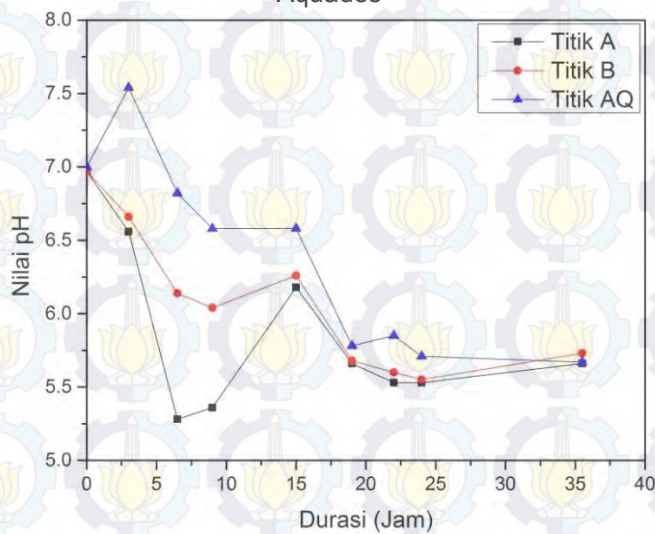


Gambar 4.5 Perubahan Warna pada Reaktor Akibat Peluruhan Anoda

Dengan adanya perubahan nilai TDS dan salinitas maka dapat dihitung persentase removal pada titik A dan B. Penarikan kation dan anion pada air aquades disebut sebagai *recovery* garam yang ada pada air limbah *reverse osmosis*. Perhitungan persentase *recovery* dihitung berdasarkan persamaan 4.1. Besar persentase *recovery* ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 4.6. Penentuan nilai *recovery* adalah perbandingan antara konsentrasi salinitas atau TDS akuades yang dikalikan dengan volume larutan akuades dengan konsentrasi salinitas atau TDS air konsentrat RO yang dikalikan volume air konsentrat RO.



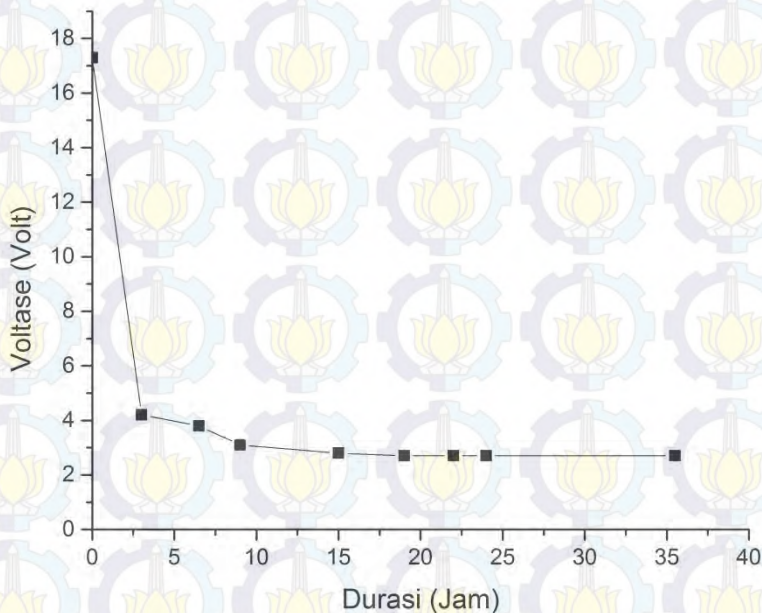
Gambar 4.6 Persentase *Recovery* TDS dan Salinitas pada Aquades



Gambar 4.7 Perubahan Nilai pH

Nilai pH pada sampel di titik A, titik B dan titik aquades juga terpengaruh oleh proses elektrodialisis. Nilai pH pada awal sampel menunjukkan pH pada range netral akan tetapi lama kelamaan menjadi asam karena proses oksidasi. Pada titik B nilai pH naik dari pH pada titik A karena adanya proses reduksi pada kompartemen katoda. Hasil pengamatan pada parameter pH ditampilkan pada Gambar 4.7. Data selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran A Tabel 3.

Voltase yang dihasilkan pada pengoperasian penelitian kali ini dapat dilihat pada Gambar 4.8.



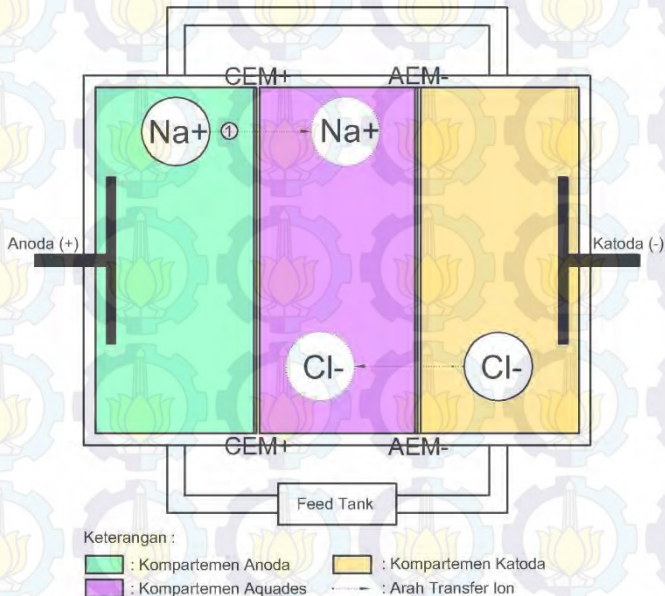
Gambar 4.8 Perubahan Voltase

Voltase tersebut stabil pada sekitar 9 jam operasi hingga hampir 36 jam waktu operasi. Hal ini menunjukkan bahwa proses elektrodialisis berjalan secara baik sehingga dapat terjadi proses penukaran kation dan anion. Voltase pada pertama kali dilakukan penelitian cenderung tinggi yaitu 17,3 volt. Semakin lama proses berlangsung maka voltase semakin turun. Dari hasil tersebut

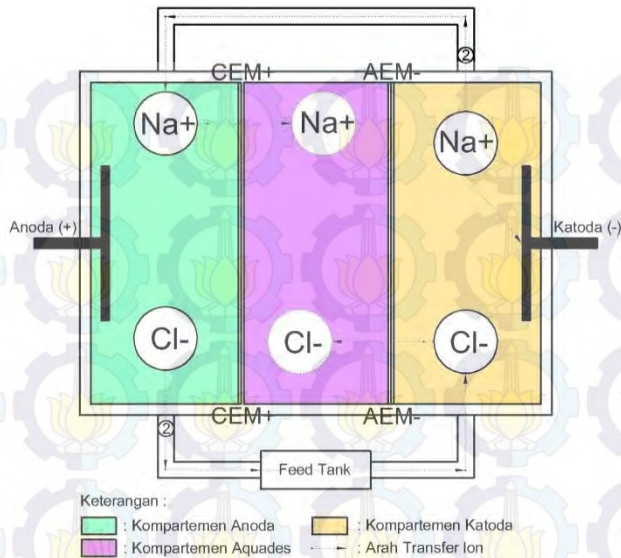
maka proses penelitian selanjutnya menggunakan 36 jam waktu operasi.

4.2 Penelitian Utama

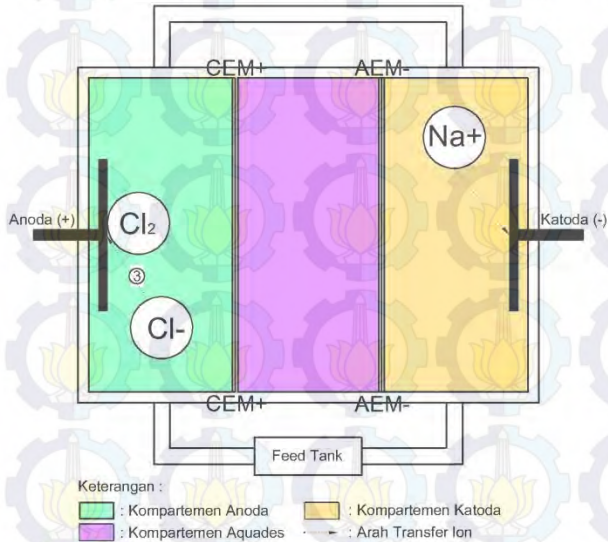
Penelitian utama dilakukan dengan dua variabel yaitu rapat arus dan jumlah kompartemen. Variasi rapat arus adalah 1 mA/cm^2 , $1,5 \text{ mA/cm}^2$, 2 mA/cm^2 , dan $2,5 \text{ mA/cm}^2$. Sedangkan variasi jumlah kompartemen adalah tiga dan lima kompartemen. Penelitian dilakukan di Jurusan Teknik Lingkungan ITS Surabaya. Analisis yang dilakukan adalah analisis salinitas, pH, klorida, *total chlorine* dan *permanganat value* (PV). Volume air limbah *reverse osmosis* yang digunakan adalah 6 liter untuk penelitian variasi tiga kompartemen dan 7 liter untuk lima kompartemen. Perbedaan volume air baku yang diolah dilakukan karena apabila pada lima kompartemen air yang diolah hanya sebanyak 6 liter maka air tidak dapat mengalir dari bak menuju reaktor karena kurangnya ketinggian air. Penelitian dilakukan selama 36 jam.



Gambar 4.9 Mekanisme Pertukaran Kation dan Anion



Gambar 4.10 Mekanisme Resirkulasi Kation dan Anion

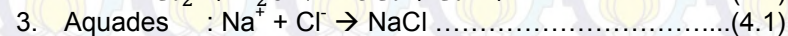
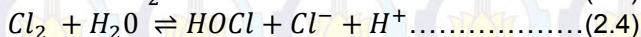
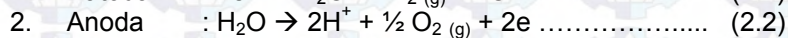
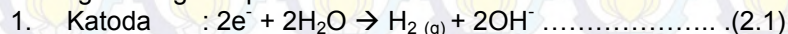


Gambar 4.11 Mekanisme Oksidasi dan Reduksi pada Reaktor

Pada penelitian ini digunakan tiga macam kompartemen, kompartemen anoda, katoda dan aquades. Setiap kompartemen mempunyai fungsi masing-masing dalam proses elektrodialisis. Dengan adanya kompartemen tersebut, kation dan anion mampu ditransfer dengan proses elektrodialisis. Jika diasumsikan kation dan anion yang berada pada air konsentrat RO adalah NaCl maka berdasarkan Gambar 4.9 - 4.11 diketahui proses yang terjadi pada reaktor penelitian elektrodialisis adalah :

1. Kation (Na^+) bergerak menuju katoda dengan melewati membran CEM+, sedangkan anion (Cl^-) bergerak menuju anoda dengan melewati membran AEM-. Kation tidak dapat melewati membran AEM- dan juga anion tidak dapat melewati membran CEM+ (Gambar 4.9).
2. Anion pada kompartemen anoda dan kation pada kompartemen katoda yang masih tersisa selain tertangkap elektroda, ion tersebut dialirkan ke kompartemen anoda maupun katoda. Proses ini bertujuan agar kation dan anion berpindah ke kompartemen yang lain melalui aliran air sehingga mampu dilakukan proses transfer ion (Gambar 4.10).
3. Anion pada kompartemen anoda yang tertangkap anoda bereaksi terhadap proses oksidasi yang terjadi pada anoda, sehingga anion (Cl^-) teroksidasi menjadi (Cl_2). Sedangkan pada kompartemen katoda dihasilkan gas H_2 menurut persamaan 2.1 (Gambar 4.11).

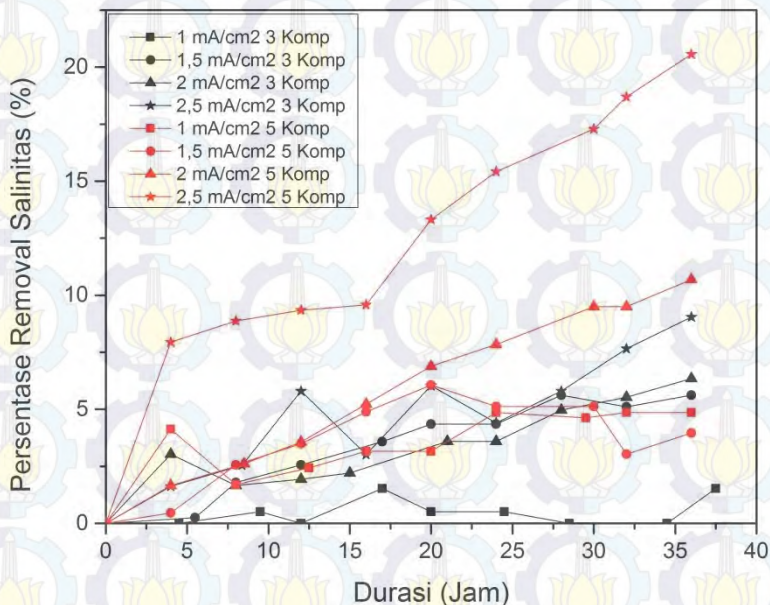
Berdasarkan hal tersebut, maka reaksi yang terjadi pada masing-masing kompartemen adalah:



4.2.1 Persentase Removal Salinitas dan Klorida

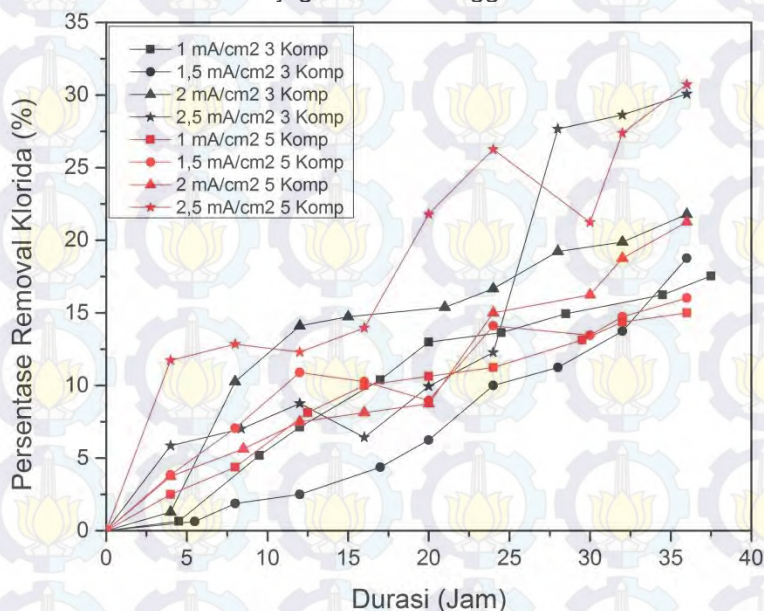
Analisa kandungan salinitas dilakukan dengan alat pH-ion Lab (Lampiran B-3). Nilai kandungan salinitas didapat dengan mencelupkan *probe* alat ke dalam air sampel. Analisa dilakukan di Jurusan Teknik Lingkungan ITS.

Salinitas adalah berat materi anorganik terlarut dalam satu kilogram air (Stumm dan Morgan, 1996). Salinitas dapat diartikan sebagai kandungan klorida yang ada pada larutan, dan merupakan total kandungan garam terlarut (Talley dan Talley, 2008). Garam terdiri dari kation (Na , Ca , Mg , dan K) dan anion (HCO_3^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , dan Cl^-). Kandungan salinitas di turunkan dengan cara memisahkan kation dan anion (salah satunya klorida) yang dikumpulkan pada kompartemen aquades. Pada kompartemen yang lain hanya tersisa kation maupun anion yang selanjutnya diresirkulasi kembali agar dapat dilakukan proses penukaran ion kembali. Persentase *removal* salinitas dan klorida dilihat setelah 36 jam waktu operasi reaktor elektrodialisis. Pada Gambar 4.12 dan 4.13 dijelaskan mengenai besar persentase *removal* salinitas dan klorida yang dapat terjadi dengan variasi rapat arus dan jumlah kompartemen. Data yang lebih lengkap berupa tabel dapat dilihat pada lampiran A tabel 4-21.



Gambar 4.12 Persentase *Removal* Salinitas

Pada variasi $1,5 \text{ mA/cm}^2$ lima kompartemen terjadi penurunan persentase *removal* salinitas pada waktu 20-36 jam. Hal ini terjadi karena putusnya anoda (bekas pen patah tulang) sehingga proses tidak berjalan secara maksimal (gambar dapat dilihat pada lampiran C gambar 5-7). Persentase *removal* salinitas tertinggi terjadi pada variasi $2,5 \text{ mA/cm}^2$ lima kompartemen yaitu sebesar 20,56%. Dengan adanya rapat arus yang besar maka ion yang berpindah akan semakin banyak (Jiang *et al.*, 2014). Pada penelitian ini diketahui bahwa dengan rapat arus yang tinggi maka *removal* salinitas juga semakin tinggi.



Gambar 4.13 Persentase *Removal* Klorida

Pada variasi tiga kompartemen dan lima kompartemen juga terdapat perbedaan persentase *removal* yang terjadi. Pada variasi rapat arus yang sama yaitu $2,5 \text{ mA/cm}^2$ reaktor tiga kompartemen mampu menurunkan salinitas sebesar 9,45%, sedangkan reaktor lima kompartemen sebesar 20,56%. Menurut Larchet *et al.* (2008), dengan meningkatkan tekanan hidrolis yaitu dengan cara menambahkan kompartemen yang disusun secara

seri. Dengan bertambahnya kompartemen maka luas membran efektif di lima kompartemen juga lebih besar daripada di tiga kompartemen. Bertambahnya luas membran efektif yaitu dua kali lipat dapat diperoleh hasil dua kali lipat juga.

Dari gambar 4.12 dan 4.13 diketahui tren penurunan salinitas dan klorida berbeda. Pada kandungan salinitas relatif naik secara konstan daripada klorida. Klorida merupakan salah satu anion yang ada dalam salinitas (Talley dan Talley, 2008). Akan tetapi salinitas tidak hanya dipengaruhi oleh klorida, melainkan ada kation-anion yang lain yang merupakan ion pembentuk garam.

Pada Gambar 4.13 menunjukkan bahwa semakin besar rapat arus yang digunakan maka hasil *removal* klorida semakin tinggi. Hasil *removal* tertinggi adalah pada rapat arus $2,5 \text{ mA/cm}^2$ yaitu 30,73% untuk reaktor lima kompartemen. Sedangkan *removal* terendah adalah pada rapat arus 1 mA/cm^2 lima kompartemen yaitu 15%. Hasil *removal* klorida relatif sama pada variasi tiga kompartemen dan lima kompartemen di rapat arus $2,5 \text{ mA/cm}^2$ (30,07% dan 30,73%). Dan juga pada rapat arus 2 mA/cm^2 sebesar 21,79% (tiga kompartemen) dan 21,25% (lima kompartemen).

4.2.2 Hasil Recovery Garam dan Total Chlorine

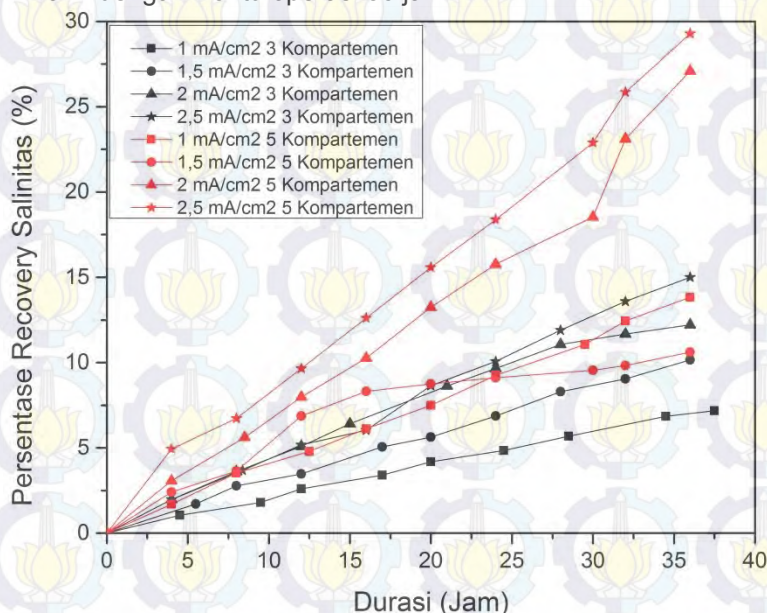
Hasil produk samping dari penelitian kali ini adalah garam terlarut dan *total chlorine*. Garam terlarut didapatkan melalui proses *recovery*. Proses *recovery* air terkonsentrasi garam dari proses elektrodialisis dilakukan untuk mendapatkan garam yang terpisah dari air limbah RO. Proses ini terjadi karena pertukaran kation dan anion yang terkumpul pada kompartemen yang berisi aquades untuk tempat penukaran ion.

Penentuan nilai *recovery* adalah perbandingan antara konsentrasi salinitas atau TDS akuades yang dikalikan dengan volume larutan akuades dengan konsentrasi salinitas atau TDS air konsentrat RO yang dikalikan volume air konsentrat RO.

Pada penelitian kali ini *recovery* garam ditentukan dengan parameter salinitas. Salinitas merupakan ukuran "rasa asin" atau konsentrasi garam pada air atau tanah. Sehingga besar konsentrasi garam sama dengan besar konsentrasi salinitas (Talley dan Talley, 2008).

Pada Gambar 4.14 dijelaskan persentase *recovery* garam yang didapat pada masing-masing variasi rapat arus dan jumlah kompartemen. Data yang lebih lengkap berupa tabel dapat dilihat pada lampiran A tabel 14-21.

Berdasarkan Jiang *et al* (2014), konsentrasi garam pada larutan terkonsentrasi garam limbah RO berkisar antara 7-11,41 % (massa/volume) dengan rapat arus sekitar 30-60 mA/cm² pada sekitar 140 menit waktu operasi. Rasio volume air konsentrasi garam dengan limbah RO adalah sekitar 1:1 dan 1:3. Dengan rasio yang lebih kecil maka konsentrasi garam yang didapat semakin besar. Sedangkan pada penelitian ini dapat menghasilkan *recovery* sebesar 14,83% dengan rapat arus 2,5 mA/cm² dengan waktu operasi 36 jam.



Gambar 4.14 Persentase *Recovery* Garam

Dari Gambar 4.14 diketahui bahwa dengan rapat arus yang semakin besar maka kation dan anion lebih banyak yang dapat ditangkap di kompartemen aquades. Sedangkan dengan perbedaan jumlah kompartemen (tiga dan lima kompartemen)

juga mempengaruhi hasil *recovery* garam pada kompartemen aquades. Jika dibandingkan dengan rapat arus yang sama yaitu pada 1 mA/cm² tiga kompartemen dan 1 mA/cm² lima kompartemen terdapat perbedaan hasil *recovery* garam. Pada variasi 1 mA/cm² tiga kompartemen *recovery* terjadi sebesar 1,53% sedangkan pada 1 mA/cm² lima kompartemen sebesar 13,84%. Sedangkan apabila dibandingkan dengan 2 mA/cm² tiga kompartemen dengan hasil *recovery* sebesar 12,21% pada 1 mA/cm² lima kompartemen hampir mempunyai kinerja yang sama untuk melakukan *recovery* garam. Persentase *recovery* garam terbesar adalah pada rapat arus 2,5 mA/cm² lima kompartemen yaitu sebesar 29,28%.

Pada rapat arus 1,5 mA/cm² lima kompartemen terlihat kenaikan persentase *recovery* garam yang cenderung stagnan, hal ini dikarenakan pada durasi 20-36 jam terjadi peristiwa putusnya anoda sehingga proses tidak berjalan maksimal.

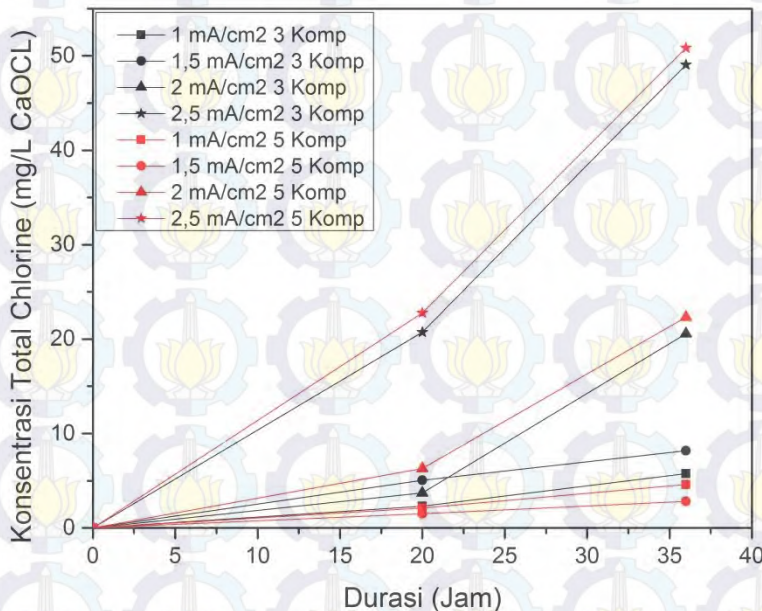
Variasi rapat arus mempengaruhi hasil *recovery* garam yang terjadi, semakin besar rapat arus maka semakin besar pula hasil *recovery* garam. Semakin besar daya yang dihasilkan maka semakin besar pula kemampuan ion untuk berpindah. (Jiang *et al.*, 2014). Variasi jumlah kompartemen juga berpengaruh terhadap luas membran efektif yang dapat menyeleksi ion yang berpindah dari satu kompartemen ke kompartemen selanjutnya. AEM hanya dapat dilewati anion dan CEM hanya dapat dilewati kation.

Hasil produk samping lainnya adalah gas klor (Cl₂) yang diukur sebagai *total chlorine*. Asam hipoklorit, hipoklorit, monokloramin, kloramin, trikloramin, gas klor adalah kandungan yang diukur pada analisa *total chlorine*. Pada kompartemen anoda terjadi proses oksidasi yang menyebabkan ion Cl⁻ teroksidasi menjadi Cl₂ (Pretz *et al.*, 1999), yang dapat dilihat pada persamaan 2.3 dan 2.4.

Adanya gas klor dapat ditandai dengan munculnya bau seperti kaporit pada kolam renang yang terjadi di reaktor uji. Menurut Deborde dan Gunten (2008), menyebutkan bahwa reaktivitas klorin tergantung pada kondisi pH larutan. Pada pH < 3, gas klor lebih banyak dihasilkan dibanding senyawa klorin yang lain. Akan tetapi pada penelitian ini pH larutan pada kompartemen anoda paling rendah hanya mencapai 3,2. Pada rentang pH 3-7,5

klorin yang dihasilkan kebanyakan adalah asam hipoklorit (HOCl), meskipun gas klor dapat terbentuk tetapi dalam kandungan yang kecil. Gas klor akan bereaksi dengan ion organik maupun inorganik sehingga menjadi senyawa klorin yang lain.

Analisa *total chlorine* dilakukan dengan metode DPD (dapat dilihat pada lampiran B-4). *Total chlorine* dianalisa pada durasi 20 jam dan 36 jam (tengah operasi dan akhir operasi). Pada Gambar 4.15 dapat diketahui besar *total chlorine* yang dihasilkan dari tiap variasi rapat arus dan jumlah kompartemen tiga dan lima.



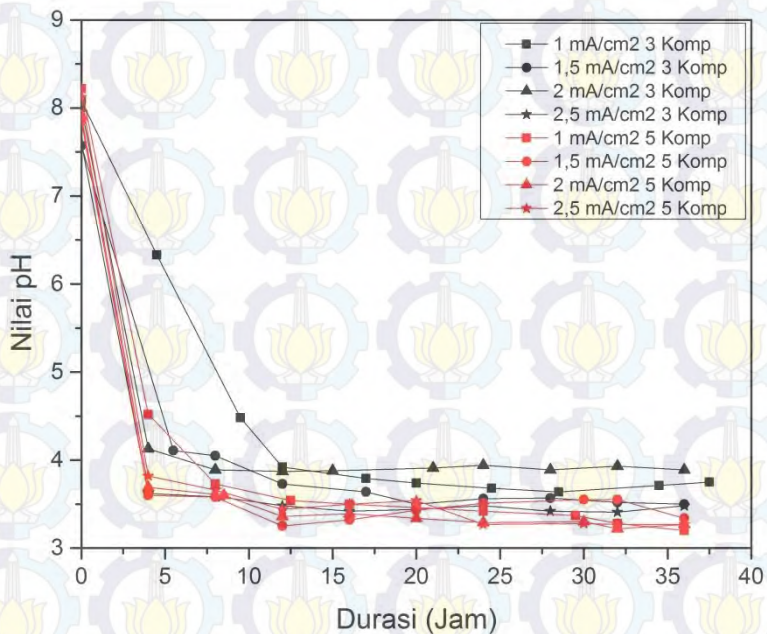
Gambar 4.15 Konsentrasi *Total Chlorine*

Menurut Pretz *et al.* (1999), dengan rapat arus yang lebih tinggi maka gas klor yang dihasilkan juga lebih besar. Sementara untuk perbedaan jumlah kompartemen gas klor yang dihasilkan relatif sama pada rapat arus yang sama. Selisihnya berkisar antara 1,1-1,7 mg/L. Sedangkan pada rapat arus 1,5 mA/cm² terdapat selisih yang jauh yaitu sekitar 5,3 mg/L dikarenakan

pada rapat arus $1,5 \text{ mA/cm}^2$ lima kompartemen terjadi putusnya anoda pada durasi 20-36 jam menyebabkan proses oksidasi tidak berjalan maksimal. Hasil *total chlorine* yang paling besar adalah pada $2,5 \text{ mA/cm}^2$ lima kompartemen yaitu sebesar $50,83 \text{ mg/L}$.

4.2.3 Nilai pH pada Kompartemen Anoda

Adanya proses oksidasi dan reduksi pada kompartemen anoda dan katoda menyebabkan perubahan nilai pH pada air limbah RO yang diolah. Pada Gambar 4.16 disebutkan bahwa semakin lama proses terjadi maka pH cenderung turun. Nilai pH awal limbah RO dalam *range* pH netral yaitu sekitar 6-8.



Gambar 4.16 Nilai pH Berdasarkan Waktu

Selain dari ion H^+ yang terjadi karena proses oksidasi (persamaan 4.7), penurunan nilai pH disebabkan karena adanya logam yang terlarut dari proses oksidasi pada anoda (Van der Bruggen, 2015). Anoda yang berupa bekas pen patah tulang mempunyai kandungan campuran platina dan besi. Besi tersebut

larut kedalam air limbah RO yang diolah dan menyebabkan suasana asam.

Pada rapat arus 1 mA/cm^2 lima kompartemen penurunan nilai pH terjadi paling besar yaitu dari pH 8,2 menjadi 3,2 dalam waktu 36 jam. Sehingga dapat diketahui pada rapat arus tersebut anoda mengalami korosi lebih banyak daripada reaktor dengan variasi yang lain.

Nilai pH semakin lama akan semakin turun dikarenakan ion H^+ semakin banyak. Penurunan nilai pH pada akhir operasi berkisar antara pH 3,9-3,2. Nilai pH tersebut masih dalam rentang ketahanan membran CEM dan AEM yaitu pada pH 1-10 sehingga membran tidak mengalami kerusakan pada proses elektrodialisis. Selain itu nilai pH juga mempengaruhi senyawa klorin yang dihasilkan. Pada pH <3 lebih banyak gas klor yang dihasilkan, sedangkan pada pH 3-7,5 senyawa klorin yang terbentuk adalah asam hipoklorit (HOCl) serta pada pH $>7,5$ hipoklorit (ClO^-) terbentuk (Deborde dan Gunten, 2008). Asam hipoklorit dan hipoklorit merupakan fungsi derajat keasaman yang berarti hipoklorit yang berada dalam suasana asam menjadi asam hipoklorit.

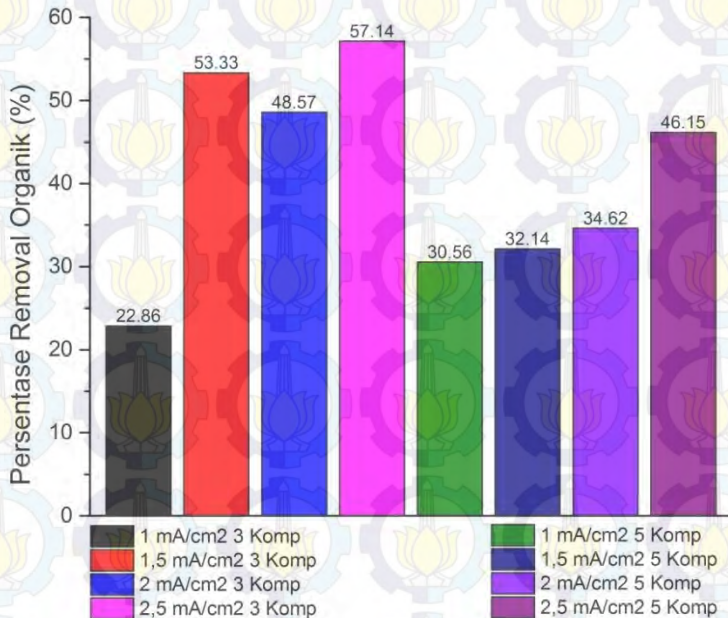
4.2.4 Penurunan Nilai Permanganat

Analisis nilai permanganat dilakukan untuk mengetahui kandungan organik yang ada pada air limbah RO. Dan juga untuk mengetahui seberapa besar tingkat penurunan organik dengan proses elektrodialisis. Elektrodialisis mampu untuk menurunkan kandungan organik walaupun tidak maksimal (Mirfada, 2014). Proses perpindahan ion yang terjadi dapat menyeleksi ion substansi terlarut yang mengandung organik. Dengan adanya proses oksidasi, kandungan zat organik mampu diturunkan (Dobrevsky dan Pavlova, 1992). Selain dengan proses oksidasi zat organik, keberadaan gas klor pada larutan konsentrat RO dapat mengikat zat organik (Deborde dan Gunten, 2008). Pada Gambar 4.17 dijelaskan seberapa besar tingkat penurunan kandungan organik pada akhir operasi masing-masing variasi.

Pada rapat arus $2,5 \text{ mA/cm}^2$ tiga kompartemen didapatkan *removal* nilai permanganat (PV) paling besar yaitu 57,14%. Hal ini disebabkan karena membran belum mengalami *fouling* sehingga zat organik yang teroksidasi berjalan maksimal.

Sedangkan untuk variasi yang lain ada kemungkinan zat organik terakumulasi pada permukaan membran sehingga mempengaruhi hasil analisis (Mirfada, 2014).

Dapat diketahui juga dengan rapat arus yang semakin besar maka zat organik yang dihilangkan juga semakin besar. Pada variasi lima kompartemen terlihat jelas hasil tersebut, sedangkan pada rapat arus $1,5 \text{ mA/cm}^2$ tiga kompartemen *removal* PV lebih besar daripada variasi 2 mA/cm^2 tiga kompartemen disebabkan karena adanya anoda yang putus pada jam 20-36 jam pada rapat arus $1,5 \text{ mA/cm}^2$ sehingga proses oksidasi zat organik terganggu daripada pada variasi 2 mA/cm^2 . Pada penelitian Dobrevsky dan Pavlova (1992), persentase *removal* kandungan organik berkisar antara 36,2%-74,7%.



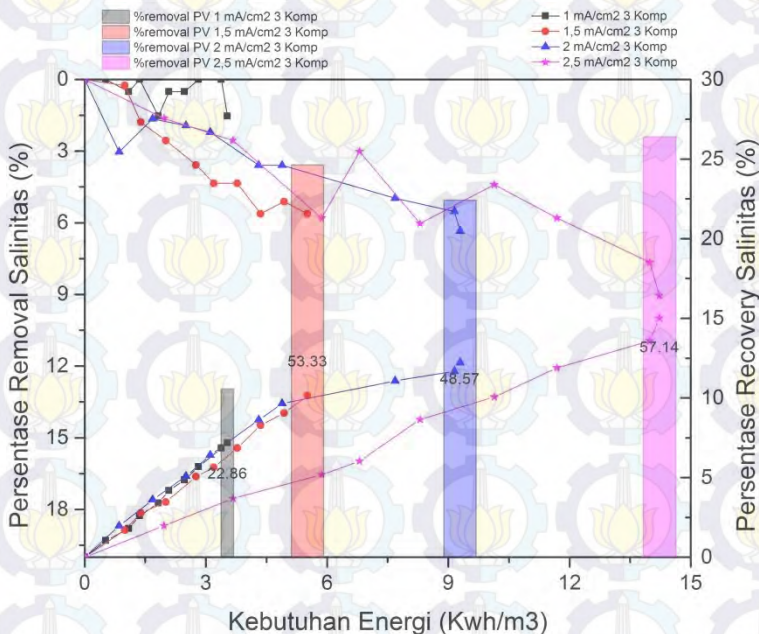
Gambar 4.17 Persentase *Removal* Nilai Permanganat

4.2.5 Kebutuhan Energi

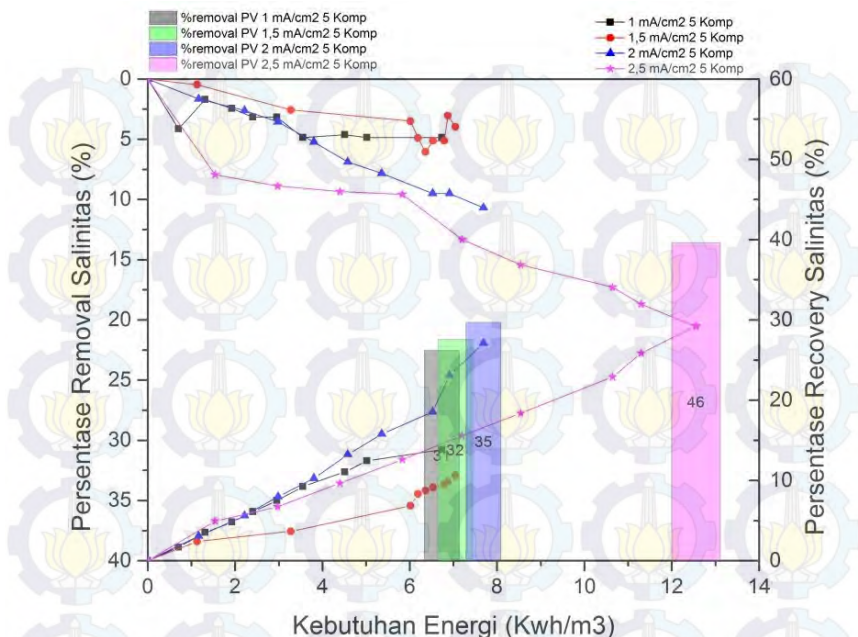
Proses perpindahan ion kation dan anion ke kompartemen aquades terjadi karena adanya daya hantar listrik.

Dengan variasi rapat arus dan jumlah kompartemen dapat diketahui kebutuhan energi yang dibutuhkan untuk melakukan proses elektrodialisis pada masing-masing variasi. Kebutuhan energi didapatkan dengan mengetahui voltase dan arus yang terjadi selama proses elektrodialisis berlangsung. Perhitungan kebutuhan energi mengacu pada persamaan 2.6; 2.7; 2.8 dan 2.9. Volume air baku yang diolah pada tiga kompartemen adalah 6 liter sedangkan pada lima kompartemen adalah 7 liter.

Pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 dijelaskan besarnya kebutuhan energi yang dibutuhkan untuk melakukan *removal* salinitas, *recovery* salinitas (garam) dan *removal* nilai permanganat terhadap kebutuhan energi (kwh/m³) pada reaktor tiga kompartemen dan lima kompartemen.



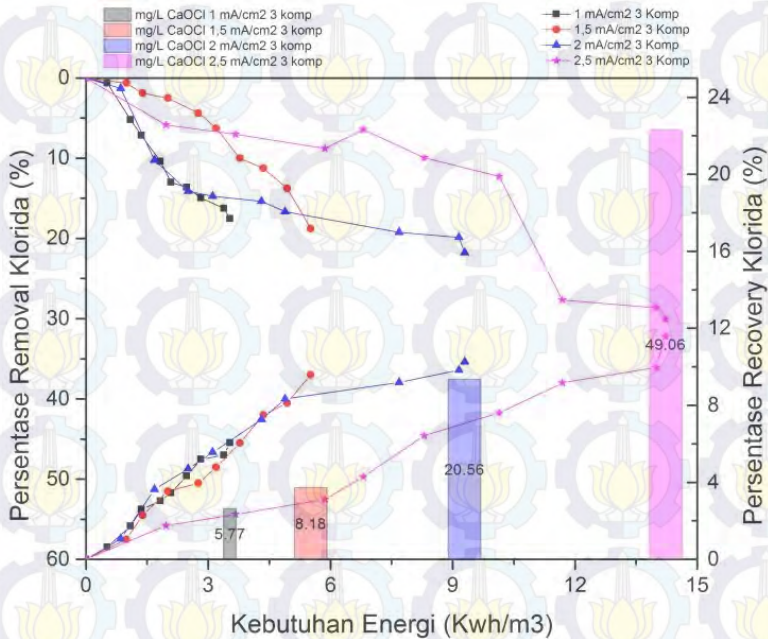
Gambar 4.18 *Removal* dan *Recovery* Salinitas serta *Removal* Nilai Permanganat Terhadap Kebutuhan Energi Reaktor Tiga Kompartemen



Gambar 4.19 *Removal* dan *Recovery* Salinitas serta *Removal* Nilai Permanganat Terhadap Kebutuhan Energi Reaktor Tiga Kompartemen

Semakin besar rapat arus yang digunakan maka semakin besar kebutuhan energi yang dihasilkan sesuai dengan persamaan 2.9. Rapat arus mempengaruhi arus listrik yang digunakan sehingga beban yang digunakan semakin besar. Kebutuhan energi pada variasi 2,5 mA/cm² tiga kompartemen adalah 14,23 kwh/m³ sedangkan pada variasi 2,5 mA/cm² lima kompartemen sebesar 12,56 kwh/m³. Hal ini terjadi karena adanya *fouling* pada membran (lampiran C gambar 4) yang menyebabkan hambatan pada proses elektrodialisis semakin besar sehingga mempengaruhi voltase yang digunakan juga semakin besar. *Removal* dan *recovery* salinitas atau garam terbesar adalah pada variasi 2,5 mA/cm² lima kompartemen yaitu 20,56% dan 29,28% dengan energi yang dibutuhkan 12,56 kwh/m³. Sedangkan untuk *removal* dan *recovery* paling kecil

adalah pada variasi 1 mA/cm² tiga kompartemen yaitu sebesar 1,53% dan 7,19% dengan energi yang dibutuhkan 3,53 kwh/m³.

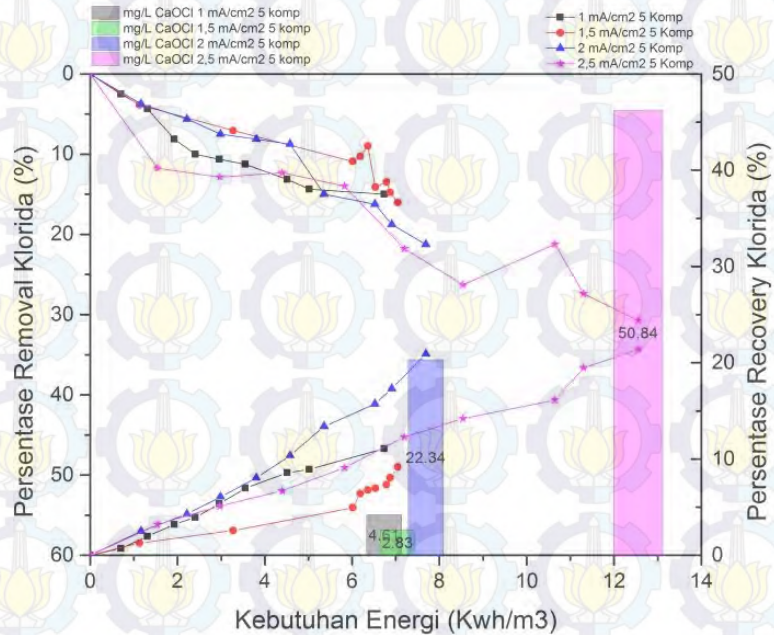


Gambar 4.20 *Removal* dan *Recovery* Klorida serta Produksi *Total Chlorine* Terhadap Kebutuhan Energi Reaktor Tiga Kompartemen

Pada Gambar 4.20 dan 4.21 dijelaskan juga mengenai *removal* dan *recovery* klorida (Cl⁻) (data yang lebih lengkap berupa tabel dapat dilihat pada lampiran A tabel 14-22) serta produksi *total chlorine* terhadap energi yang dibutuhkan. *Removal* klorida lebih kecil daripada *recovery* dikarenakan tidak semua klorida pindah ke kompartemen aquades, melainkan dapat menjadi gas Cl₂ atau mengoksidasi zat yang lain. Semakin besar *removal* dan *recovery* klorida maka energi yang dibutuhkan juga semakin besar. Dan dengan energi yang semakin besar gas Cl₂ yang dihasilkan semakin besar pula (Pretz *et al.*, 1999).

Removal dan *recovery* klorida terbesar adalah pada variasi 2,5 mA/cm² lima kompartemen yaitu 30,73% dan 21,39% dengan energi yang dibutuhkan 12,56 kwh/m³. Sedangkan untuk

removal klorida paling kecil adalah pada variasi 1 mA/cm² lima kompartemen yaitu sebesar 15% dan *recovery* klorida paling kecil adalah pada variasi 1 mA/cm² tiga kompartemen yaitu 6,06%.

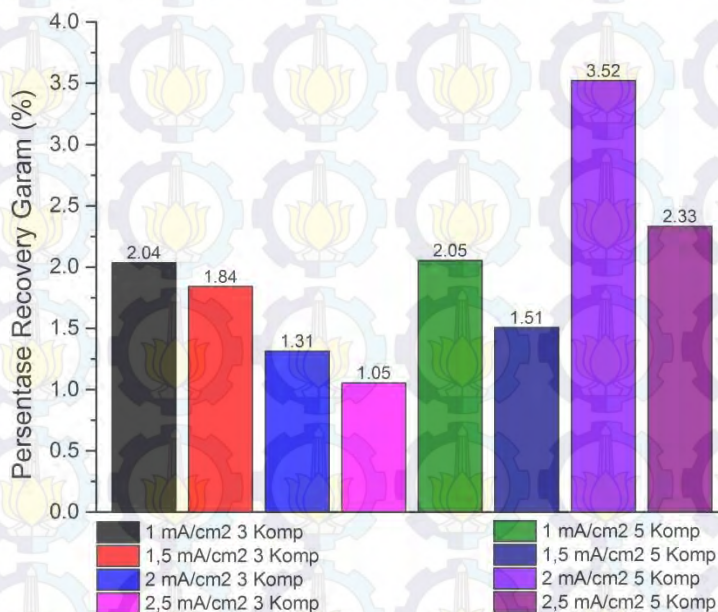


Gambar 4.21 *Removal dan Recovery Klorida serta Produksi Total Chlorine Terhadap Kebutuhan Energi Reaktor LimaKompartemen*

Untuk mengetahui variasi rapat arus dan jumlah kompartemen yang optimal dalam melakukan *recovery* garam dengan energi yang paling kecil dapat dilihat pada Gambar 4.22. Pada gambar tersebut menunjukkan bahwa dengan 1 kwh/m³ seberapa besar dapat proses *recovery* garam dapat terjadi.

Pada Gambar tersebut diketahui pada variasi tiga kompartemen semakin besar rapat arus yang digunakan maka persentase *recovery* semakin kecil, tidak sebanding dengan energi yang dibutuhkan untuk melakukan *recovery*. Sedangkan pada variasi lima kompartemen terlihat perbedaan hasil *recovery* pada tiap variasi rapat arus. Dengan 1 kwh/m³ variasi 2 mA/cm² lima kompartemen dapat menghasilkan *recovery* garam sebesar

3,52%. Sedangkan apabila rapat arus dinaikkan yaitu pada 2,5 mA/cm² lima kompartemen lebih kecil hasil *recovery* garamnya. Sehingga dapat diketahui pada variasi 2 mA/cm² dengan lima kompartemen paling optimal untuk melakukan *recovery* garam jika dilihat pada penggunaan energinya.



Gambar 4.22 Persentase *Recovery* Garam yang Dapat Dihasilkan dengan 1 Kwh/m³

4.2.6 Uji Statistik *Anova-Two Ways*

Uji statistik dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari variasi rapat arus dan jumlah kompartemen terhadap *removal* atau penurunan salinitas. Uji statistik dilakukan dengan metode *anova-two ways* karena adanya dua faktor yang mempengaruhi sampel pada perlakuan yang sama atau waktu yang sama, seperti rapat arus dan jumlah kompartemen divariasikan pada waktu yang sama saat running. Uji *anova-two ways* dilakukan dengan *software* Microsoft Excel 2010. Pada tabel 4.2 dijelaskan

hasil uji *anova*. Data yang lebih lengkap dapat dilihat pada lampiran A Tabel 23.

Tabel 4.2 Hasil Uji *Anova-Two Ways*

<i>Source of Variation</i>	<i>SS</i>	<i>df</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P-value</i>	<i>F crit</i>
Sample	212,5	1	212,5	22,7	0,00000095	3,97
Columns	453,3	3	151,1	16,2	0,000000040	2,73
Interaction	142,4	3	47,5	5,1	0,00303147	2,73
Within	673,4	72	9,4			
Total	1481,7	79				

Dari tabel tersebut pada kolom *source of variation* di baris sample adalah variasi jumlah kompartemen sedangkan columns adalah variasi rapat arus. Alpha yang digunakan adalah 0,05 atau 5%. Dapat diketahui bahwa variasi jumlah kompartemen berpengaruh terhadap penurunan salinitas dan variasi rapat arus juga berpengaruh dengan melihat nilai *P-value*. Apabila *P-value* lebih kecil dari 0,05 maka dapat dinyatakan berpengaruh sedangkan apabila lebih dari 0,05 maka tidak berpengaruh.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian, dapat ditarik kesimpulan dari proses elektrodialisis pada masing-masing variasi, yaitu:

1. Variasi rapat arus dan jumlah kompartemen berpengaruh signifikan terhadap penurunan salinitas. Semakin tinggi rapat arus maka semakin besar hasil penurunan salinitas. Penggunaan lima kompartemen menunjukkan hasil penurunan salinitas yang lebih besar daripada tiga kompartemen. Penurunan salinitas terbesar adalah pada rapat arus $2,5 \text{ mA/cm}^2$ lima kompartemen yaitu 20,56%.
2. Semakin besar rapat arus yang diberikan maka tingkat *recovery* garam lebih besar, begitu pula dengan penggunaan lima kompartemen hasil *recovery*-nya lebih besar daripada tiga kompartemen. Tingkat *recovery* garam pada parameter salinitas terbesar adalah pada rapat arus $2,5 \text{ mA/cm}^2$ lima kompartemen yaitu sebesar 29,28%. Semakin besar rapat arus *total chlorine* yang dihasilkan juga semakin besar. *Total chlorine* yang dihasilkan paling besar adalah pada rapat arus $2,5 \text{ mA/cm}^2$ lima kompartemen yaitu sebesar 50,83 mg/L.

5.2 Saran

Dari penelitian ini, dapat diberikan saran sebagai berikut:

1. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai elektroda yang bersifat inert terutama pada anoda untuk hasil yang lebih representatif.
2. Diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai kandungan garam yang dapat *direcovery* dari air limbah *reverse osmosis*.
3. Diperlukan penelitian lebih lanjut tentang ketahanan elektroda terhadap rapat arus yang besar sehingga dapat mengurangi waktu operasi elektrodialisis.

LAMPIRAN A ANALISIS DAN PERHITUNGAN

Tabel 1. Konsentrasi TDS dan Salinitas di Tiap Titik Pada Penelitian Pendahuluan

Durasi (jam)	TDS (g/l)	Salinitas (ppt)	TDS (g/l)	Salinitas (ppt)	TDS (g/l)	Salinitas (ppt)
	A		B		AQ	
0	28	34,2	28	34,2	0	0
3	23,5	28,5	24,1	29	0,82	0,82
6,5	26,5	32,5	26,7	33	1,55	1,59
9	27	33	26,9	32,9	2	2,08
15	27,2	33	24,9	29,7	2,58	2,69
19	26,7	31,9	26,9	32,1	3,28	3,57
22	26,7	32,6	26,5	33,2	3,84	4,08
24	26,3	32,4	26,2	32,3	4,28	4,63
35,5	25,4	30,6	25,7	31,5	6,98	7,72

Tabel 2. Persentase Recovery di Titik Aquades Pada Penelitian Pendahuluan

Durasi	TDS	Salinitas
0	0%	0%
3	1,5%	1,2%
6,5	2,8%	2,3%
9	3,6%	3,0%
15	4,6%	3,9%
19	5,9%	5,2%
22	6,9%	6,0%
24	7,6%	6,8%
35,5	12,5%	11,3%

Tabel 3. Nilai pH dan Voltase Pada Penelitian Pendahuluan

Durasi (jam)	pH			Voltase
	A	B	AQ	
0	6,97	6,97	7	17,3
3	6,56	6,66	7,54	4,2
6,5	5,28	6,14	6,82	3,8
9	5,36	6,04	6,58	3,1
15	6,18	6,26	6,58	2,8
19	5,66	5,68	5,78	2,7
22	5,53	5,6	5,85	2,7
24	5,53	5,55	5,71	2,7
35,5	5,66	5,73	5,67	2,7

Tabel 4. Nilai Salinitas pada Reaktor 1 mA/cm² Tiga Kompartemen

Titik A			Titik B		Titik AQ	
Durasi	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH
0	39,6	8,08	39,1	6,4	0	7
4,5	37,8	6,33	39,1	6,4	0,62	7,09
9,5	38,7	4,48	38,9	4,28	1,07	6,44
12	38,9	3,92	39,1	3,97	1,54	6,41
17	39	3,79	38,5	3,82	2,02	6,32
20	39,2	3,74	38,9	3,68	2,49	6,24
24,5	39	3,68	38,9	3,68	2,88	6,06
28,5	38,9	3,64	39,1	3,68	3,38	5,38
34,5	39,1	3,71	39,1	3,75	4,07	4,65
37,5	39	3,75	38,5	3,76	4,27	6,36

Tabel 5. Nilai Salinitas pada Reaktor 1,5 mA/cm² Tiga Kompartemen

Durasi	Titik A		Titik B		Titik AQ	
	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH
0	41,5	7,57	41,5	7,57	0	7
5,5	40	4,11	41,4	4,74	1,06	5,93
8	40,5	4,05	40,8	4,02	1,73	5,7
12	40,6	3,73	40,5	3,76	2,16	5,24
17	40,2	3,64	40,1	3,68	3,15	4,78
20	40,1	3,5	39,8	3,54	3,51	4,51
24	39,6	3,56	39,8	3,6	4,27	4,28
28	39,4	3,57	39,3	3,58	5,16	4,15
32	39,2	3,52	39,5	3,54	5,63	4,08
36	39,2	3,5	39,3	3,52	6,32	3,96

Tabel 6. Nilai Salinitas pada Reaktor 2 mA/cm² Tiga Kompartemen

Durasi	Titik A		Titik B		Titik AQ	
	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH
0	36,2	8	36,2	8	0	7
4	35,1	4,13	35,1	4,02	1,07	6,34
8	35,5	3,89	35,6	3,91	1,96	5,69
12	35,5	3,87	35,5	3,88	2,76	5,09
15	35,4	3,88	35,4	3,94	3,48	4,59
21	34,6	3,91	34,9	3,95	4,68	4,49
24	34,6	3,94	34,9	4	5,24	4,24
28	34,3	3,89	34,4	3,96	6,01	4,35
32	34,2	3,93	34,2	3,96	6,34	4,22
36	33,9	3,89	33,9	3,91	6,63	4,23

Tabel 7. Nilai Salinitas pada Reaktor 2,5 mA/cm² Tiga Kompartemen

Durasi	Titik A		Titik B		Titik AQ	
	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH
0	43,1	7,6	43,1	7,6	0	7
4	42	3,62	42,4	3,64	1,28	6,6
8,375	41,9	3,58	42	3,6	2,38	6,32
12	41,2	3,48	40,6	3,5	3,35	6,04
16	41,6	3,42	41,8	3,44	3,9	5,43
20	40,8	3,44	40,5	3,47	5,59	4,38
24	40,9	3,48	41,2	3,5	6,51	4,21
28	40,4	3,42	40,6	3,44	7,69	4,1
32	39,8	3,41	39,8	3,42	8,78	3,82
36	39,8	3,48	39,2	3,52	9,7	3,74

Tabel 8. Nilai Salinitas pada Reaktor 1 mA/cm² Lima Kompartemen

Durasi	Titik A		Titik B		Titik AQ	
	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH
0	41,1	8,22	41,1	8,22	0	7
4	39,8	4,52	39,4	5,36	1,04	7,06
8	40,4	3,73	40,4	3,73	2,17	6,84
12,5	40,2	3,54	40,1	3,59	2,96	6,63
16	39,9	3,5	39,8	3,53	3,77	6,46
20	39,7	3,46	39,8	3,48	4,62	6,62
24	39,3	3,42	39,1	3,47	5,7	5,82
29,5	39	3,37	39,2	3,37	6,82	4,59
32	39	3,28	39,1	3,26	7,67	4,41
36	38,5	3,2	39,1	3,25	8,53	4,27

Tabel 9. Nilai Salinitas pada Reaktor 1,5 mA/cm² Lima Kompartemen

Durasi	Titik A		Titik B		Titik AQ	
	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH
0	42,9	7,85	42,9	7,85	0	7
4	41	3,6	42,7	3,74	1,55	4,74
8	41,7	3,58	41,8	3,59	2,35	4,89
12	41,4	3,25	41,4	3,27	4,42	4,23
16	41	3,32	40,8	3,41	5,35	4,06
20	40,7	3,43	40,3	3,48	5,63	4,08
24	40,7	3,51	40,7	3,54	5,86	4,16
30	40,8	3,55	40,7	3,58	6,14	4,1
32	41,5	3,55	41,6	3,55	6,32	4,11
36	41,4	3,34	41,2	3,41	6,83	4,14

Tabel 10. Nilai Salinitas pada Reaktor 2 mA/cm² Lima Kompartemen

Durasi	Titik A		Titik B		Titik AQ	
	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH
0	42,1	7,91	42,1	7,91	0	7
4	39,9	3,69	41,4	3,68	1,94	6,24
8,5	41,3	3,6	41	3,53	3,54	5,88
12	40,9	3,36	40,6	3,42	5,04	4,86
16	40,1	3,39	39,9	3,44	6,48	4,29
20	39,3	3,34	39,2	3,36	8,36	4,02
24	38,9	3,29	38,8	3,32	9,96	3,94
30	38,1	3,3	38,1	3,37	11,7	3,85
32	38,1	3,22	38,1	3,26	14,6	3,71
36	37,9	3,27	37,6	3,3	17,1	3,65

Tabel 11. Nilai Salinitas pada Reaktor 2,5 mA/cm² Lima Kompartemen

Durasi	Titik A		Titik B		Titik AQ	
	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH	Salinitas (ppt)	pH
0	42,8	8,12	42,8	8,12		
4	39,4	3,82	39,4	3,86	3,17	6,72
8	39,7	3,66	39	3,72	4,32	4,96
12	39	3,44	38,8	3,54	6,2	4,98
16	36,3	3,5	38,7	3,48	8,1	4,7
20	37,9	3,54	37,1	3,4	10	4,1
24	36,2	3,27	36,2	3,32	11,8	3,79
30	35,7	3,28	35,4	3,33	14,7	3,75
32	35	3,27	34,8	3,34	16,6	3,69
36	34,2	3,27	34	3,32	18,8	3,69

Tabel 12. Kandungan Klorida pada Titik B Tiap Variasi (mg/L)

Durasi	3 Kompartemen				5 Kompartemen			
	1 mA/cm2	1,5 mA/cm2	2 mA/cm2	2,5 mA/cm2	1 mA/cm2	1,5 mA/cm2	2 mA/cm2	2,5 mA/cm2
0	14656	15090	14847	19649	15090	17925	18385	20568
4	14561	14995	14656	18500	14712	17236	17696	18155
8	13895	14807	13324	18270	14429	16662	17351	17925
12	13609	14712	12753	17925	13864	15972	17006	18040
16	13134	14429	12658	18385	13581	16087	16891	17696
20	12753	14147	12563	17696	13486	16317	16776	16087
24	12658	13581	12372	17236	13392	15398	15627	15168
28	12467	13392	11991	17236	13109	15512	15398	16202
32	12277	13015	11896	14024	12921	15283	14938	14938
36	12087	12260	11611	13740	12826	15053	14478	14248

Tabel 13. Kandungan Klorida pada Titik AQ Tiap Variasi (mg/L)

Durasi	3 Kompartemen				5 Kompartemen			
	1 mA/cm ²	1,5 mA/cm ²	2 mA/cm ²	2,5 mA/cm ²	1 mA/cm ²	1,5 mA/cm ²	2 mA/cm ²	2,5 mA/cm ²
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	143	236	238	517	189	402	804	1149
8	381	519	809	689	519	804	1379	1839
12	571	802	1047	919	849	1551	1953	2413
16	666	896	1237	1264	1037	2011	2585	3275
20	761	1085	1618	1896	1415	2126	3332	4424
24	952	1368	1856	2241	1839	2183	4309	5113
28	1142	1698	2046	2701	2263	2298	5056	5803
32	1190	1839	2189	2937	2358	2528	5573	7009
36	1332	2169	2284	3411	2924	2873	6722	7699

Tabel 14. Tingkat *Removal* dan *Recovery* pada Reaktor 1
mA/cm² Tiga Kompartemen

durasi	persen removal (%)		persen recovery (%)	
	Salinitas	klorida	Salinitas	klorida
0	0,00	0,00	0,00	0,00
4,5	0,00	0,65	1,04	0,65
9,5	0,51	5,19	1,80	1,73
12	0,00	7,14	2,59	2,60
17	1,53	10,39	3,40	3,03
20	0,51	12,99	4,19	3,46
24,5	0,51	13,64	4,85	4,33
28,5	0,00	14,94	5,69	5,19
34,5	0,00	16,23	6,85	5,41
37,5	1,53	17,53	7,19	6,06

Tabel 15. Tingkat *Removal* dan *Recovery* pada Reaktor 1,5 mA/cm² Tiga Kompartemen

persen removal (%)			persen recovery (%)	
durasi	Salinitas	klorida	Salinitas	klorida
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
5,5	0,26	0,63	1,70	1,04
8,0	1,79	1,88	2,78	2,29
12,0	2,56	2,50	3,47	3,54
17,0	3,58	4,38	5,06	3,96
20,0	4,35	6,25	5,64	4,79
24,0	4,35	10,00	6,86	6,04
28,0	5,63	11,25	8,29	7,50
32,0	5,12	13,75	9,04	8,13
36,0	5,63	18,75	10,15	9,58

Tabel 16. Tingkat *Removal* dan *Recovery* pada Reaktor 2 mA/cm² Tiga Kompartemen

persen removal (%)			persen recovery (%)	
durasi	Salinitas	klorida	Salinitas	klorida
0	0,00	0,00	0,00	0,00
4	3,04	1,28	1,97	1,07
8	1,66	10,26	3,61	3,63
12	1,93	14,10	5,08	4,70
15	2,21	14,74	6,41	5,56
21	3,59	15,38	8,62	7,26
24	3,59	16,67	9,65	8,33
28	4,97	19,23	11,07	9,19
32	5,52	19,87	11,68	9,83
36	6,35	21,79	12,21	10,26

Tabel 17. Tingkat *Removal* dan *Recovery* pada Reaktor 2,5 mA/cm² Tiga Kompartemen

persen removal (%)			persen recovery (%)	
durasi	Salinitas	klorida	Salinitas	klorida
0	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,62	5,85	1,98	1,75
8,375	2,55	7,02	3,68	2,34
12	5,80	8,77	5,18	3,12
16	3,02	6,43	6,03	4,29
20	6,03	9,94	8,65	6,43
24	4,41	12,28	10,07	7,60
28	5,80	27,66	11,89	9,16
32	7,66	28,63	13,58	9,97
36	9,05	30,07	15,00	11,57

Tabel 18. Tingkat *Removal* dan *Recovery* pada Reaktor 1 mA/cm² Lima Kompartemen

persen removal (%)			persen recovery (%)	
durasi	Salinitas	klorida	Salinitas	klorida
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00
4,0	4,14	2,50	1,69	0,71
8,0	1,70	4,38	3,52	1,96
12,5	2,43	8,13	4,80	3,21
16,0	3,16	10,00	6,12	3,93
20,0	3,16	10,63	7,49	5,36
24,0	4,87	11,25	9,25	6,96
29,5	4,62	13,13	11,06	8,57
32,0	4,87	14,38	12,44	8,93
36,0	4,87	15,00	13,84	11,07

Tabel 19. Tingkat *Removal* dan *Recovery* pada Reaktor 1,5 mA/cm² Lima Kompartemen

durasi	persen removal (%)		persen recovery (%)	
	Salinitas	klorida	Salinitas	klorida
0	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,47	3,85	2,41	1,28
8	2,56	7,05	3,65	2,56
12	3,50	10,90	6,87	4,95
16	4,90	10,26	8,31	6,41
20	6,06	8,97	8,75	6,78
24	5,13	14,10	9,11	6,96
30	5,13	13,46	9,54	7,33
32	3,03	14,74	9,82	8,06
36	3,96	16,03	10,61	9,16

Tabel 20. Tingkat *Removal* dan *Recovery* pada Reaktor 2 mA/cm² Lima Kompartemen

durasi	persen removal (%)		persen recovery (%)	
	Salinitas	klorida	Salinitas	klorida
0	0,00	0,00	0,00	0,00
4	1,66	3,75	3,07	2,50
8,5	2,61	5,62	5,61	4,29
12	3,56	7,50	7,98	6,07
16	5,23	8,13	10,26	8,04
20	6,89	8,75	13,24	10,36
24	7,84	15,00	15,77	13,39
30	9,50	16,25	18,53	15,71
32	9,50	18,75	23,12	17,32
36	10,69	21,25	27,08	20,89

Tabel 21. Tingkat *Removal* dan *Recovery* pada Reaktor 2,5
mA/cm² Lima Kompartemen

persen removal (%)			persen recovery (%)	
durasi	Salinitas	klorida	Salinitas	klorida
0	0,00	0,00	0,00	0,00
4	7,94	11,73	4,94	3,19
8	8,88	12,85	6,73	5,11
12	9,35	12,29	9,66	6,70
16	9,58	13,97	12,62	9,10
20	13,32	21,79	15,58	12,29
24	15,42	26,26	18,38	14,21
30	17,29	21,23	22,90	16,12
32	18,69	27,37	25,86	19,47
36	20,56	30,73	29,28	21,39

Tabel 22. Kebutuhan Energi Tiap Variasi (kwh/m³)

Durasi	3 Kompartemen				5 Kompartemen			
	1 mA/cm2	1,5 mA/cm2	2 mA/cm2	2,5 mA/cm2	1 mA/cm2	1,5 mA/cm2	2 mA/cm2	2,5 mA/cm2
0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0,53	0,99	0,85	1,97	0,71	1,13	1,17	1,54
8	1,09	1,39	1,68	3,67	1,31	3,27	2,22	2,97
12	1,36	2,01	2,51	5,87	1,93	6,02	2,98	4,40
16	1,83	2,76	3,11	6,80	2,41	6,19	3,80	5,83
20	2,09	3,20	4,31	8,30	2,96	6,36	4,58	7,20
24	2,48	3,78	4,89	10,14	3,55	6,53	5,36	8,54
28	2,82	4,36	7,69	11,69	4,51	6,79	6,52	10,64
32	3,38	4,94	9,15	13,99	5,02	6,87	6,91	11,30
36	3,53	5,52	9,29	14,23	6,73	7,05	7,69	12,56

Tabel 23. Analisis Menggunakan *Anova-Two Ways-With Replication*

SUMMARY	1 mA/cm2	1,5 mA/cm2	2 mA/cm2	2,5 mA/cm2	Total
<i>3 Kompartemen</i>					
Count	10	10	10	10	40
Sum	4,60	33,25	32,87	45,94	116,66
Average	0,46	3,32	3,29	4,59	2,92
Variance	0,38	4,38	3,77	7,87	6,13
<i>5 Kompartemen</i>					
Count	10	10	10	10	40
Sum	33,82	34,73	57,48	121,03	247,06
Average	3,38	3,47	5,75	12,10	6,18
Variance	2,66	4,06	13,65	38,05	26,41
<i>Total</i>					
Count	20	20	20	20	
Sum	38,42	67,98	90,36	166,97	
Average	1,92	3,40	4,52	8,35	
Variance	3,69	4,00	9,85	36,59	

LAMPIRAN B ANALISIS LABORATORIUM

1. Kandungan *Total Dissolved Solid*

- Mengambil sampel di outlet reaktor setiap waktu yang telah ditentukan pada tiap variasi
- Membersihkan alat ion-pH lab yang telah dikalibrasi dengan aquades
- Mengatur parameter yang akan diukur pada ion-pH lab menjadi TDS
- Mencelupkan batang ion-pH lab ke dalam sampel
- Membaca hasil pengukuran setelah muncul tanda “☺” di alat ion-pH lab

2. Nilai pH

- Mengambil sampel di outlet reaktor setiap waktu yang telah ditentukan pada tiap variasi
- Membersihkan alat ion-pH lab yang telah dikalibrasi dengan aquades
- Mengatur parameter yang akan diukur pada ion-pH lab menjadi pH
- Mencelupkan batang ion-pH lab ke dalam sampel
- Membaca hasil pengukuran setelah muncul tanda “☺” di alat ion-pH lab

3. Salinitas

- Mengambil sampel di outlet reaktor setiap waktu yang telah ditentukan pada tiap variasi
- Membersihkan alat ion-pH lab yang telah dikalibrasi dengan aquades
- Mengatur parameter yang akan diukur pada ion-pH lab menjadi salinitas
- Mencelupkan batang ion-pH lab ke dalam sampel
- Membaca hasil pengukuran setelah muncul tanda “☺” di alat ion-pH lab
- Mencelupkan batang ion-pH lab ke dalam sampel
- Membaca hasil pengukuran setelah muncul tanda “☺” di alat ion-pH lab

4. *Total Chlorine*

- Membuat kurva kalibrasi CaOCl_2 dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 515 nm

- Mengambil sampel di outlet reaktor setiap tengah operasi dan akhir operasi pada tiap variasi
- Mengencerkan sampel sampai 50 kali pengenceran
- Mengambil 5ml sampel dituangkan pada kuvet tabung
- Menambahkan serbuk DPD satu sachet
- Mengocok sekitar ± 30 detik dan tunggu sampai warna merah muda pertama muncul
- Memasukkan blanko aquades
- Baca dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 515 nm dan catat absorbansinya
- Setelah mendapatkan persamaan dari kurva kalibrasi maka besar *total chlorine* adalah sebagai berikut:

$$y = ax + b$$

Dengan :

y = absorbansi (A)

x = kandungan CaOCl_2 sebagai Cl_2 (mg/l)

5. Kandungan Klorida (Cl^-)

- Menuangkan 25 mL sampel air ke dalam erlenmayer 100 mL
- Menambahkan 0.5 mL indikator K_2CrO_4 dan kocok hingga merata
- Menambahkan 1 sendok atau spatula bubuk MgO
- Menitrasi dengan larutan AgNO_3 1/35.45 N hingga timbul warna kemerah-merahan yang pertama
- Menghitung kadar klorida dengan menggunakan rumus

$$\text{Cl}^- \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = 1000 \times \frac{0,0141 \times (a - b) \times 35.45 \times F}{25 \text{ mL} \times f}$$

Dengan :

a = mL titrasi sampel

b = mL titrasi blanko

F = faktor koreksi AgNO_3

f = faktor pengenceran sampel

6. Kandungan Nilai Permanganat (*Permanganat Value*)

- Mengambil 100 mL sampel dan masukkan ke dalam erlenmeyer
- Tambahkan 2 mL H_2SO_4 4N bebas organik

- Tambahkan beberapa tetes KmnO_4 0,01 N sampai timbul warna pink tipis
- Panaskan hingga mendidih selama 1 menit kemudian ditambahkan 10 mL KmnO_4 0,01 N
- Setelah 10 menit tambahkan asam oksalat 0,1 N sebanyak 1 mL
- Titrasikan dengan KmnO_4 0,01 N sampai warna pink tipis
- Menghitung mg/L KmnO_4 dengan menggunakan rumus:

$$\text{KmnO}_4 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{1000}{100} \times \{ ((10 + X) \times N(\text{KmnO}_4)) - (10 \times 0,1) \} \times 31,6$$

Dengan : x = mL titrasi KmnO_4
 N = normalitas KmnO_4



LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN

No.	Gambar	Keterangan
1.		Konfigurasi reaktor lima kompartemen
2.		Adaptor DC <i>adjustable power supply</i> untuk mengontrol arus listrik yang digunakan

No.	Gambar	Keterangan
3.		<p>Konfigurasi reaktor elektrodialisis dengan bak penampung</p>
4.		<p>Presipitat pada membran AEM di kompartemen katoda</p>

No.	Gambar	Keterangan
5.		<p>Korosi yang terjadi pada anoda (platina bekas pen patah tulang)</p>
6.		<p>Perubahan bentuk anoda karena korosi (anoda yang digunakan merupakan kunci sebagai pengganti platina bekas pen patah tulang)</p>
7.		<p>Putusnya anoda karena korosi</p>

DAFTAR PUSTAKA

- Anglada, Ä., Urtiaga, A., dan Ortiz, I. 2009. **Contributions of Electrochemical Oxidation to Waste-water Treatment: Fundamentals and Review of Applications.** J Chem Technol Biotechnol 84, 1747-1755.
- Brady, J. E. 1999. **General Chemistry Principles and Structure 5th ed.** Binarupa Aksara: Jakarta.
- Charette, M. A. dan Sholkovitz, E. R. 2002. **Oxidative Precipitation of Groundwater-Derived Ferrous Iron in The Subterranean Estuary of A Coastal Bay.** Geophysical Research Letters Volume 29.
- Chen, Z., Xie, G., Chen, Z., Zheng, H., dan Zhuang, C. 2011. **Field Test of A Solar Seawater Desalination Unit with Triple Effect Falling Film Regeneration in Northern China.** Solar Energy 86, 31-39.
- Deborde, M. dan Gunten, U. 2008. **Reactions of Chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment-Kinetics and Mechanisms: A Critical Review.** Water Research 42, 13-51.
- Diaratih, V. I. 2015. **Alternatif Pemanfaatan Air Limbah Dari Reverse Osmosis dengan Metode Elektrolisis untuk Menghasilkan Gas Hidrogen, Oksigen, dan Chlor.** Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Dobrevsky, IV. dan Pavlova, ST. 1992. **Organic Matter Removal from Natural Waters by Electrodialysis Demineralization.** Desalination 86, 43-48.
- Elazhar, F., Elazhar, M., Hafsi, M., Taky, M., dan El Midaoui, A. 2014. **Performances of Electrodialysis Process in Desalination of Brackish Waters at Various Salinities and Voltage.** International Journal of Advanced Chemistry 2, 49-52.
- Gao, L., Liu, D., dan Yang, J. 2009. **Modelling of A Three-Compartment Membrane Electrodialysis in H₂SO₄-(NH₄)₂SO₄-NH₃.H₂O System.** Journal of Membrane Science 344, 252-257.
- Greenlee, L. F., Lawler, D. F., Freeman, B. D., dan Moulin, P. 2009. **Reverse Osmosis Desalination: Water Sources,**

- Technology dan Today's Challenges.** Water Research 43 (9), 2317-2348.
- Hoofman, E. J. 2003. **Membrane Separations Technology Single-stage, Multistage, and Differential Permeation.** Gulf Professional Publishing: USA.
- Huang, C., Xu, T., Zhang, Y., Xue, Y., dan Chen, G. 2007. **Application of Electrodialysis to the Production of Organic Acids: State of the Art and Recent Developments.** Journal of Membrane Science 288, 1-12.
- Jeppesen, T., Shu, L., Keir, G., dan Jegatheesan, V. 2009. **Metal Recovery from Reverse Osmosis Concentrate.** Journal of Cleaner Production 17, 703-707.
- Jiang, C., Wang, Y., Zhang, Z., dan Xu, T. 2013. **Electrodialysis of Concentrated Brine From RO Plant to Produce Coarse Salt and Freshwater.** Journal of Membrane Science, 450, 323-330.
- Khawaji, A. D., Kutubkhanah, I. K., dan Wie, J-M. 2008. **Advances in Seawater Desalination Technologies.** Desalination 221, 47-69.
- Korngold, E., Aronov, L., dan Daltrophe, N. 2009. **Electrodialysis of Brine Solutions Discharged from An RO Plant.** Desalination 242, 215-227.
- Lattemann, S., dan Höpner, T., 2008. **Environmental Impact and Impact Assessment of Seawater Desalination.** Desalination 220, 1-15.
- Lee, K. P., Arnot, T. C., dan Mattia, D. 2011. **A Review of Reverse Osmosis Membrane Materials for Desalination—Development to Date and Future Potential.** Journal of Membrane Science 370, 1-22.
- Larchet, C., Zabolotsky, V. I., Pismenskaya, N., Nikonenko, V. V., Tskhay, A., Tastanov, K., dan Pourcelly, G. 2008. **Comparison of different ED stack conceptions when applied for drinking water production from brackish waters.** Desalination 222, 489-496.
- Mirfada, Z. 2014. **Pengaruh Tegangan dan Jumlah Kompartemen pada Desalinasi Air Payau Menggunakan Elektrodialisis.** Jurusan Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

- Pérez-González, A., Urtiaga, A. M., Ibáñez, R., dan Ortiz, I. 2012. **State of Art and Review on the Treatment Technologies of Water Reverse Osmosis Concentrates**. Water Research 46, 267-283.
- Praneeth K., Manjunath D., Suresh K. Bhargava, James Tardio, dan Sridhar S. 2013. **Economical Treatment of Reverse Osmosis Reject of Textile Industry Effluent by Electrodialysis-Evaporation Integrated Process**. Desalination 333, 82-91.
- Pretz, J., Korngold, E., dan Kedem, O. 1999. **A-Chlorine Free Anode for Electrodialysis**. Separation and Technology 15, 147-152.
- Reddy, K.S., Kumar, K.R., Tadhg, S., O'Donovan, dan Mallick, T.K. 2011. **Performance Analysis of An Evacuated Multi-Stage Solar Water Desalination System**. Desalination 288 (2012) 80-92.
- Riyanto. 2013. **Elektrokimia dan Aplikasinya**. Graha Ilmu: Yogyakarta.
- Roberts, D. A., Johnston, E. L., dan Knott, N. A. 2010. **Impacts of Desalination Plant Discharges on the Marine Environment: A Critical Review of Published Studies**. Water Research 44, 5117-5128.
- Said, N. I. 2003. **Aplikasi Teknologi Osmosis Balik untuk Memenuhi Kebutuhan Air Minum di Kawasan Pesisir atau Pulau Terpencil**. Jurnal Teknik Lingkungan P3TL-BPPT 4 (2), 15-34.
- Schoeman, J. J. dan Thompson, M. A. 1996. **Electrodialysis. Water Treatment Membrane Processes**. Malleviale, J., Odendaal, P. E., dan Wiesner, M. R. McGraw-Hill: USA.
- Sheng, J. J. 2011. **Chapter 3 – Salinity Effect and Ion Exchange. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery. Theory and Practice**. Elsevier.
- Stratmann, H. 2004. **Assesment of Electrodialysis Water Desalination Process Cost**. Institute of Chemical Engineering, University of Stuttgart: German.
- Stratmann, H. 2010. **Electrodialysis , A Mature Technology with A Multitude of New Applications**. Desalination 264, 268-288.

- Stumm, W dan Morgan, J. J. 1996. **Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters**. New York: Wiley.
- Sutrisna, P. D. 2002. **Bipolar Membrane Electrodialysis : Teknologi Atraktif untuk Produksi Asam dan Basa**. Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Surabaya.
- Talley, D. M. dan Talley, T. S. 2008. **Salinity : Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences**. Elsevier.
- Topayung, D. 2011. **Pengaruh Arus Listrik dan Waktu Proses Terhadap Ketebalan dan Massa Lapisan yang Terbentuk pada Proses Elektroplating Pelat Baja**. Jurnal Ilmiah Sains 11, 1-5.
- Valero, F., Barcelo, A., dan Arbos, R. 2011. **Electrodialysis Technology. Theory and Applications**. Desalination, Trends and Technology.
- Van der Bruggen, B. 2015. **Advanced in Membrane Technologies for Water Treatment, 1st Edition Chapter: 6 (Advances in Electrodialysis for Water Treatment)**. Woodhead Publishing: USA.
- Zhang, Y., Ghyselbrecht, K., Vanherpe, R., Meeschaert, B., Pinoy, L., dan Van der Bruggen, B. 2012. **RO Concentrate Minimization by Electrodialysis: Techno-Economic Analysis and Environmental Concerns**. Journal of Environmental Management 107, 28-36.

BIOGRAFI PENULIS



Penulis lahir di Surabaya, 28 Januari 1993. Bertempat tinggal di JL. Cendrawasih Bunderan 105 A, Perumahan Rewwin, Waru, Sidoarjo. Jenjang pendidikan penulis pada waktu SD adalah bertempat di SDN Kepuh Kiriman 1. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMPN 1 Waru. Penulis melanjutkan sekolah di SMAN 3 Sidoarjo dan lulus pada tahun 2011. Penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Jurusan Teknik Lingkungan ITS pada tahun 2011. Semasa

kuliah, penulis aktif melaksanakan kegiatan mahasiswa diantaranya aktif berorganisasi. Pada tahun 2012, penulis diamanahi sebagai koordinator *Steering-committee* kaderisasi dan juga merupakan anggota dari Kelompok Pecinta dan Pemerhati Lingkungan (KPPL). Pada tahun 2013, penulis diamanahi sebagai Kepala Divisi Bakti Lingkungan di komunitas KPPL. Penulis aktif melakukan kegiatan lingkungan di wilayah surabaya dan pernah menjadi pembicara pada kegiatan lingkungan skala surabaya. Selain itu penulis juga aktif di lingkup institut, pada tahun 2012 dan 2013 penulis turut andil dalam kegiatan Gerigi ITS sebagai panitia. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT Pertamina RU-VI Balongan, Indramayu dan melakukan kajian pengolahan air limbah. Penulis dapat dihubungi melalui email: imandimassetya@yahoo.com.